



**Tiago Correia
Rodrigues Mendonça**

**Estudo de formulações para o dimensionamento de
vigas-coluna metálicas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Nuno Lopes, Professor auxiliar, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação do Doutor Paulo Vila Real, Professor Catedrático, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago
professora auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real
professor catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Os meus agradecimentos aos Professores Nuno Lopes e Paulo Vila Real, respectivamente meu orientador e co-orientador pelas linhas orientadoras, partilha de conhecimento e críticas para a obtenção dos melhores resultados.

Ao Eng. Carlos Couto pelos seus conhecimentos transmitidos para a ajuda da obtenção da folha de cálculo de dimensionamento à encurvadura.

À Professora Joana Velho pela sua disponibilidade imediata e na ajuda dispensada.

Agradeço à Sofia Nogueira pela compreensão e companheirismo nos momentos menos bons deste trabalho e na ajuda dispensada da parte escrita.

A todos os meus amigos pelo apoio e pelos momentos durante o percurso académico.

Por fim aos meus pais e irmãos, embora ausentes, sempre preocupados e na motivação que demonstraram na realização deste trabalho. O meu muito obrigado pelo que fizeram e pelo que fazem por mim!

palavras-chave

Viga-coluna, encurvadura lateral, Eurocódigo 3, aço carbono, aço inoxidável, fogo.

resumo

Quando uma viga-coluna não possui rigidez lateral suficiente pode encurvar. Este fenómeno de instabilidade pode ocorrer para vigas-coluna de diferentes comprimentos de encurvadura e para diferentes materiais.

O objectivo desta tese é o comportamento das vigas-coluna quando sujeitas a este tipo de acção. Foram utilizadas duas abordagens diferentes, o método 1 do grupo Franco-Belga e o método 2 do grupo Austro-Alemão que se encontram na parte 1-1 do Eurocódigo 3.

Com a formulação utilizada da parte 1-1 o procedimento utilizado para as partes 1-2 e 1-4 do Eurocódigo 3 foi o mesmo com as devidas adaptações para cada parte e foi feito um estudo comparativo das formulações para o dimensionamento de vigas-coluna.

Esta tese encontra-se dividida em cinco partes, a primeira parte centra-se na regulamentação sobre o dimensionamento de vigas-coluna e dos métodos existentes. Na segunda parte é apresentada a metodologia utilizada pelo Eurocódigo 3 na classificação de um perfil. Na terceira parte demonstra a capacidade de resistência de uma secção transversal para depois pensar numa viga-coluna como um elemento na sua análise de resistência. Na quarta parte é feito um estudo comparativo das curvas de encurvadura do aço carbono das partes 1-1 e 1-2 do Eurocódigo 3 e na quinta parte é feito um estudo comparativo das curvas de encurvadura do aço inoxidável das partes 1-1, 1-2 e 1-4 do Eurocódigo 3.

keywords

Beam-column, lateral buckling, Eurocode 3, carbon steel, stainless steel, fire.

abstract

When a beam-column does not have lateral stiffness it may bend. This phenomenon of instability may occur to beams-column of different lengths of buckling and to different materials.

The objective of this dissertation is the behavior of the beams-column when they are subject to this type of action. Two different methods were used: the first method of the French-Belgian group and the second method of the Austrian-German group, which can be found in part 1-1 of Eurocode 3.

With the formulas used in part 1-1 the procedure used for parts 1-2 and 1-4 of Eurocode 3 was the same, adapted, however, to each part and a comparative study of the formulas for the design of the beams-column was carried out.

This dissertation is divided in five parts. The first part is based on the regulation of the design of beams-column and the existing methods. In the second part it is presented the methodology used in Eurocode 3 when classifying a profile. The third part shows the capacity of resistance of a cross section to think later about a beam-column as an element in its analysis of resistance. In the fourth part a comparative study is done to the curves of the buckling of carbon steel of parts 1-1 and 1-2 of Eurocode 3. Finally in the fifth part a comparative study is done to the curves of the buckling of stainless steel of parts 1-1, 1-2 and 1-4 of Eurocode 3.

Índice

Capítulo 1 - *Introdução*

1.1. Considerações gerais	3
1.2. Objectivos.....	5
1.3. Estruturação da tese.....	5

Capítulo 2 - *Classificação da secção transversal*

2.1. Considerações gerais	9
2.2. Classificação da secção pelo EC3-1-1	10
2.2.1. Secção com compressão.....	11
2.2.2. Secção com momento em y ou momento em z.....	12
2.2.3. Secção com compressão e momento em y.....	13
2.2.5. Secção com compressão e momento em z.....	15
2.2.6. Secção com compressão e momentos em y e z.....	16
2.2.7. Classificação da secção a altas temperaturas	17
2.3. Classificação da secção pelo EC3-1-4	17
2.3.1. Secção com compressão.....	19
2.3.2. Secção com momento em y ou momento em z.....	20
2.3.3. Secção com compressão e momento em y.....	20
2.3.5. Secção com compressão e momento em z.....	21
2.3.6. Secção com compressão e momentos em y e z.....	22
2.3.7. Classificação da secção a altas temperaturas	23
2.4. Conclusões	22

Capítulo 3 - *Verificação da secção transversal*

3.1.Considerações gerais.....	25
3.2. Verificação da resistência da secção em aço carbono.....	25
3.2.1. Compressão.....	25
3.2.2. Flexão simples.....	26
3.2.3. Flexão Composta.....	27
3.2.4. Flexão composta e desviada.....	30
3.3. Verificação da resistência da secção em aço carbono ao fogo	34
3.4. Verificação da resistência da secção em aço inoxidável.....	34

3.5. Verificação da resistência da secção em aço inoxidável ao fogo	34
3.6. Conclusões	34

Capítulo 4 - Verificação do elemento em aço carbono

4.1. Considerações gerais	37
4.2. Procedimentos à temperatura ambiente	37
4.2.1. Elemento à compressão	37
4.2.2. Elemento sujeito à flexão	41
4.2.2.1. Secções laminadas e soldadas equivalentes	43
4.2.3. Elemento sujeitos à flexão composta com compressão	47
4.2.3.1. Método 1	48
4.2.3.2. Método 2	50
4.3. Comparação das formulações em aço carbono à temperatura ambiente	52
4.3.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	52
4.3.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	54
4.3.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	56
4.3.4. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$	61
4.3.5. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,8$	62
4.4. Utilização das curvas ao fogo no aço carbono	65
4.4.1. Elemento comprimido a altas temperaturas	65
4.4.2. Elemento sujeito à flexão com encurvadura lateral a altas temperaturas	67
4.4.3. Elemento sujeito à flexão composta com compressão	69
4.4.3.1. Método 1	70
4.4.2.2. Método 2	70
4.5. Comparação das formulações em aço carbono ao fogo	71
4.5.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	71
4.5.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	72
4.5.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	74
4.6. Conclusões	75

Capítulo 5 - Verificação do elemento em aço inoxidável

5.1. Considerações gerais	79
5.2. Utilização das curvas ao aço inoxidável à temperatura ambiente	79
5.2.1. Elementos à compressão	79

5.2.2. Elementos sujeitos à flexão composta com compressão.....	81
5.2.2.1. Método 1	83
5.2.2.2. Método 2	84
5.3. Comparação das formulações em aço inoxidável à temperatura ambiente	84
5.3.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	84
5.3.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	86
5.3.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	88
5.3.4. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$	91
5.3.5. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,8$	92
5.4. Utilização das curvas ao fogo no aço inox.....	93
5.4.1. Elemento sujeito à flexão com encurvadura lateral a altas temperaturas	93
5.4.1.1. Método 1	96
5.4.1.2. Método 2	96
5.5. Comparação das formulações em aço inoxidável ao fogo	96
5.5.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	96
5.5.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	98
5.5.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	100
5.6. Conclusões	102
 Capítulo 6 - Conclusões	
6.1. Considerações finais	105
6.2. Desenvolvimentos futuros.....	106
 Bibliografia	 107

Índice de Figuras

Capítulo 2 - Classificação da secção transversal

Figura 2. 1 - Comportamento das secções	9
Figura 2. 2 - Esquerda: elemento interno; direita: elemento saliente.....	10
Figura 2. 3 - Diagrama de tensões – N.....	11
Figura 2. 4 - Esquerda: Diagrama de tensões - M_y ; direita: Diagrama de tensões – M_z	12
Figura 2. 5 - Diagrama de tensões - $N+M_y$	13
Figura 2. 6 - Parte da secção submetida à compressão e flexão	13
Figura 2. 7 - Distribuição das tensões em partes.....	14
Figura 2. 8 - Diagrama de tensões - $N+M_z$	15
Figura 2. 9 - Esquerda: ponta à compressão; direita: ponta à tracção.....	15
Figura 2. 10 - Diagrama de tensões - $N+M_y+M_z$	16

Capítulo 3 - Verificação da secção transversal

Figura 3. 1 - Área efectiva de um perfil de classe 4.....	26
Figura 3. 2 - Gráfico da variação da flexão composta no eixo y-y	28
Figura 3. 3 - Gráfico da variação da flexão composta no eixo z-z	30
Figura 3. 4 - Gráfico da variação da flexão composta (HEA 300)	30
Figura 3. 5 - Flexão composta e desviada	33
Figura 3. 6 - Secção do perfil HEA200 com flexão composta e desviada.....	33

Capítulo 4 - Verificação do elemento em aço carbono

Figura 4. 1 - Elemento sujeito à compressão	37
Figura 4. 2 - Elemento simplesmente apoiado com imperfeição inicial.....	38
Figura 4. 3 - Diagrama de tensões residuais (Dowling et al., 1988).....	38
Figura 4. 4 - Comportamento de uma coluna, segundo Euler.....	40
Figura 4. 5 - Gráfico das Curvas de encurvadura	41
Figura 4. 6 - Viga sujeita à flexão	42
Figura 4. 7 - Viga sujeita à encurvadura lateral (Lopes, 2009).....	42
Figura 4. 8 - Viga sujeita a encurvadura com torção	47
Figura 4. 9 - diagrama de momento	49
Figura 4. 10 - Viga-coluna com encurvadura lateral para $\psi_y=1$ a 20°C	52
Figura 4. 11 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	53
Figura 4. 12 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	53

Figura 4. 13 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	53
Figura 4. 14 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	53
Figura 4. 15 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	53
Figura 4. 16 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	54
Figura 4. 17 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	55
Figura 4. 18 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	55
Figura 4. 19 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	55
Figura 4. 20 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	56
Figura 4. 21 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	56
Figura 4. 22 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $N_{Ed}/N_{pl} = 0,2$	57
Figura 4. 23 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	58
Figura 4. 24 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	59
Figura 4. 25 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	59
Figura 4. 26 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	61
Figura 4. 27 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	61
Figura 4. 28 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	61
Figura 4. 29 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	61
Figura 4. 30 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	62
Figura 4. 31 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	62
Figura 4. 32 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$	63
Figura 4. 33 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$	63
Figura 4. 34 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$	63
Figura 4. 35 - Viga-coluna: $N_{Ed}/N_{pl} = 0,0$	64
Figura 4. 36 - Elemento sujeito à compressão ao fogo	65
Figura 4. 37- Factor de redução para a relação da força-tensão do aço carbono	67
Figura 4. 38 - Viga sujeita à flexão com encurvadura lateral ao fogo	68
Figura 4. 39 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	71
Figura 4. 40 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	71
Figura 4. 41 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	71
Figura 4. 42 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	71
Figura 4. 43 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	72
Figura 4. 44 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	73
Figura 4. 45 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	73

Figura 4. 46 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	73
Figura 4. 47 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C	74
Figura 4. 48 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $N_{Ed}/N_{pl} = 0,0$; 500°C	74
Figura 4. 49 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C	75

Capítulo 5 - Verificação do elemento em aço inoxidável

Figura 5. 1- Elemento sujeito à compressão	79
Figura 5. 2 - Viga sujeita à encurvadura com torção	81
Figura 5. 3 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	85
Figura 5. 4 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	85
Figura 5. 5 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	85
Figura 5. 6 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	85
Figura 5. 7 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$	85
Figura 5. 8 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	86
Figura 5. 9 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	87
Figura 5. 10 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	88
Figura 5. 11 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	88
Figura 5. 12 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$	88
Figura 5. 13 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	89
Figura 5. 14 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	90
Figura 5. 15 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	90
Figura 5. 16 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$	90
Figura 5. 17 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	92
Figura 5. 18 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	92
Figura 5. 19 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$	92
Figura 5. 20 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$	93
Figura 5. 21 - Viga sujeita à flexão com encurvadura lateral ao fogo	93
Figura 5. 22 - Factor de redução para a relação da força-tensão do aço inoxidável	95
Figura 5. 23 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	97
Figura 5. 24 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	97
Figura 5. 25 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	97
Figura 5. 26 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	97
Figura 5. 27 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C	97
Figura 5. 28 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	98

Figura 5. 29 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	99
Figura 5. 30 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	99
Figura 5. 31 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C	99
Figura 5. 32 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C	100
Figura 5. 33 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C	101
Figura 5. 34 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C	101
Figura 5. 35 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C	101

Índice de tabelas

Capítulo 2 - Classificação da secção transversal

Tabela 2. 1 - Classificação de elementos internos (alma) (CEN, 2005)	10
Tabela 2. 2 - Classificação de elementos externos (banzo) (CEN, 2005).....	11
Tabela 2. 3 - Classificação de elementos internos (alma) (CEN, 2006)	18
Tabela 2. 4 - Classificação de elementos externos (banzo) (CEN, 2006).....	18

Capítulo 4 - Verificação do elemento em aço carbono

Tabela 4. 1 - Selecção da curva de encurvadura para perfis I laminados	40
Tabela 4. 2 - Factores de imperfeição para curvas de encurvadura	40
Tabela 4. 3 - Secções laminadas e soldadas equivalentes	44
Tabela 4. 4 - Factores de correcção.....	44
Tabela 4. 5 - Coeficientes de determinação do momento crítico elástico.....	46
Tabela 4. 6 - Factores de redução para uma determinada temperatura.....	67

Capítulo 5 - Verificação do elemento em aço inoxidável

Tabela 5. 1 - Selecção da curva de encurvadura para perfis I laminados (CEN,2005).....	81
Tabela 5. 2 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço inoxidável 1,4301 a altas temperaturas	94
Tabela 5. 3 - Valores nominais da tensão de cedência, da tensão última e do módulo de elasticidade de do aço inoxidável 1,4301 laminados a quente	95

Nomenclatura

Letras do alfabeto latino

A	Área da secção
A_{eff}	Área da secção efectiva
b	Largura da secção
C_{mi}	Coefficiente de momento equivalente segundo os eixos i (yy ou zz)
$C_{mi,0}$	Factores de momento tendo em conta diferentes diagramas (método 1)
C_{mLT}	Coefficiente de momento equivalente para a encurvadura lateral
C_{yy} , C_{yz} , C_{zy} e C_{zz}	Coefficientes calibrados numericamente segundo o método 1 para o dimensionamento de vigas-coluna
E	Módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente
f	Função para considerar diferentes diagramas de momento na encurvadura lateral
$f_{0,2 p, \theta}$	Tensão limite de 2% da total a uma temperatura θ
f_u	Tensão última
$f_{u, \theta}$	Tensão última a uma temperatura θ
f_y	Tensão de cedência
G	Módulo de elasticidade transversal
h_w	Altura da alma
I_i	Momentos de inércia segundo os eixos i (yy ou zz)
$k_{2\%, \theta}$	Factor de redução para a determinação da resistência do aço inox a uma temperatura θ
$k_{E, \theta}$	Factor de redução do módulo de elasticidade linear
k_{LT}	Factor de interacção a afectar o momento em torno yy , devido à encurvadura lateral em flexão composta
$k_{y, \theta}$	Factor de redução da tensão de cedência
k_z	Factor de interacção a afectar os momentos em torno do eixo $z-z$ em flexão composta
$k_{0,2 p, \theta}$	Factor de redução para a elasticidade a uma temperatura θ
$k_{u, \theta}$	Factor de redução para a tensão última a uma temperatura θ
k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz}	Factores de interacção para o dimensionamento de vigas-coluna (método 1 e 2)
k_c	Factor de correcção dos diferentes diagramas de momento
k_w	Factor de deformação final
k_z	Factor de rotação do plano

M_i	Momento flector segundo os eixos i (yy ou zz)
$M_{i,Ed}$	Valor de cálculo do momento actuante de cálculo segundo os eixos i (yy ou zz)
N	Esforço axial
$N_{c,Rd}$	Valor de cálculo do esforço axial resistente por compressão
$N_{cr,i}$	Esforço axial crítico segundo os eixos i (yy ou zz)
N_{Ed}	Valor de cálculo do esforço axial actuante
$N_{fi,Ed}$	Valor de cálculo do esforço axial actuante ao fogo
$N_{b,fi,Rd}$	Valor de cálculo do esforço axial resistente à encurvadura por compressão ao fogo
$(N_{b,Rd})_{min}$	Valor mínimo do esforço axial resistente à encurvadura por compressão
$N_{fi,Rd}$	Valor de cálculo do esforço axial resistente por compressão ao fogo
N_{pl}, N_{Rd}	Esforço axial resistente
n, n_{pl}	Coeficiente entre o esforço axial actuante com o resistente
$M_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura por compressão ao fogo
$M_{c,Rd}$	Valor de cálculo do momento flector resistente por compressão
M_{cr}	Momento crítico elástico
$M_{pl,Rd}, M_{i,pl}$	Valor de cálculo do momento plástico resistente de dimensionamento segundo os eixos i (yy ou zz)
t_f	Espessura do banzo
t_w	Espessura da alma
$W_{eff,i}$	Módulo de flexão efectivo segundo os eixos i (yy ou zz)
$W_{el,i}$	Módulo de flexão elástico segundo os eixos i (yy ou zz)
$W_{pl,i}$	Módulo de flexão plástico segundo os eixos i (yy ou zz)
w_i	Factor que relaciona o módulo de flexão elástico com o plástico segundo o eixo i (yy ou zz)
Z_a	Posição da aplicação da carga no eixo z-z
Z_s	Posição do centro de corte no eixo z-z
Z_g	Distância entre o centro de corte e a aplicação da carga no eixo z-z

Letras do alfabeto grego

σ	Tensão
γ_{m1}	Coeficiente parcial de segurança de resistência de elementos sujeitos à encurvadura
ε	Extensão

α_i	Factor de imperfeição no eixo i (yy ou zz)
ψ_i	Relação entre os momentos aplicados nas extremidades em torno do eixo i (yy ou zz)
χ_i	Factor de redução para a encurvadura por compressão em torno do eixo i (yy ou zz)
$\chi_{i,fi}$	Factor de redução para a encurvadura por compressão em torno do eixo i (yy ou zz) ao fogo
ϕ_i	Coeficiente utilizado para o cálculo do factor de redução segundo o eixo i (yy ou zz)
$\phi_{i,fi}$	Coeficiente utilizado para o cálculo do factor de redução segundo o eixo i (yy ou zz) ao fogo
$\bar{\lambda}_i$	Esbelteza adimensional normalizada em torno do eixo i (yy ou zz)
$\bar{\lambda}_{\max}$	Esbelteza máxima
α_i	Factor de imperfeição no eixo i (yy ou zz)
α_{LT}	Factor de imperfeição para a encurvadura lateral
χ_{LT}	Factor de redução para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,fi}$	Factor de redução para a encurvadura lateral ao fogo
ϕ_{LT}	Coeficiente utilizado para o cálculo do factor de redução da encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza para encurvadura lateral
$\chi_{LT,mod}$	Factor de redução para a encurvadura lateral tendo em conta diferentes diagramas de momento
$\beta_{M,\psi}$	Factor de momento equivalente uniforme tendo em conta diferentes diagramas
$\bar{\lambda}_0$	Esbelteza adimensional normalizada para a encurvadura lateral devido a diagrama de momentos uniforme
θ	Temperatura do aço

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Considerações gerais	3
1.2. Objectivos.....	5
1.3. Estruturação da tese.....	5

1.1. Considerações gerais

A introdução do aço na construção civil tem vindo a ganhar consistência devido à variedade de soluções estruturais que pode apresentar. Comparativamente com o betão as estruturas de aço são diversificadas devido às formas que apresentam: perfis, chapas espessas, chapas delgadas nervuradas ou não e ainda cabos, para além dos varões utilizados no betão armado.

Os perfis são amplamente utilizados na construção civil porque são um material homogéneo e resistente, e tem a vantagem de apresentar pesos relativamente menores em relação a outros materiais. Isto deve-se à relação inércia/peso ser alta e com este facto é possível obter maiores vãos na execução de estruturas e são cerca de 6 vezes menos pesadas que as estruturas em betão (metálica, 2010).

Este tipo de material permite uma maior liberdade na execução dos projectos, não sendo tão rigoroso como o betão ou a madeira e o facto de apresentar secções mais esbeltas permite aproveitar melhor o espaço interior. Existem vários tipos de perfis laminados de aço com secções laminadas: I, H ou em U. Cada secção apresenta melhores comportamentos em relação a outras, por exemplo, o perfil em I oferece uma melhor relação entre a resistência à flexão e o seu peso próprio. Enquanto os perfis HEA, HEB e HEM resistem a flexões maiores no eixo fraco do que os IPE e IPN devido aos seus maiores banzos e com isso são mais caros. Logo os perfis em I são usados em vigas por terem uma melhor inércia no eixo forte (vertical), enquanto os perfis em H são mais indicados para pilares tendo em conta que a compressão depende apenas da secção do perfil.

O aço apresenta secções esbeltas que permitem aliviar as fundações da estrutura em relação ao peso e tem a grande vantagem de ser um material compatível com o betão ou a madeira. Além disso não é necessário haver uma fiscalização tão rigorosa como no betão, visto que as peças já vêm inteiras sendo apenas necessário executar as suas ligações. As esbelteza das secções dos perfis de aço provocam vários comportamentos de instabilidade (Dubina et al., 2002) tanto a nível global como a nível local. A instabilidade dos perfis tem sido estudada há vários anos (Massonnet, 1976) no comportamento das vigas-coluna sujeitas à encurvadura por flexão ou encurvadura com torção lateral.

A tendência é de aumentar a esbelteza dos elementos de aço para terem uma maior resistência e nem sempre são tidos em conta os aspectos económicos (Boissonnade et al., 2002). Juntando a este pormenor o custo acrescido que este material trás à obra, mas em compensação a experiência tem demonstrado que existe uma maior durabilidade das estruturas tendo em conta a sua manutenção correcta.

Durante os últimos anos tem sido feito um grande desenvolvimento ao nível da investigação para que se possa obter os melhores resultados da encurvadura, assim tendo em conta as normas já existentes de cada país obteve-se uma norma europeia (Eurocódigo). Os estudos da encurvadura são

efectuados no regime elástico-plástico (Boissonnade et al., 2004), uma vez que na mesma secção algumas fibras têm uma tensão superior à tensão de cedência e outras ainda no elástico, e têm sido realizados estudos comparativos. Para verificar a precisão das fórmulas propostas ao longo dos anos, os estudos comparativos basearam-se neste fenómeno (encurvadura) com ensaios experimentais (Bureau et al., 1999) ou em simulações numéricas de elementos finitos (Ofner, 1997, Boissonnade et al., 2002).

O objectivo do EC3 é que haja além da segurança, uma maior economia na concepção das estruturas. O EC3-1-1 apresenta duas abordagens diferentes para o dimensionamento de vigas-coluna em que são denominados por Método 1 (Franco-Belga) e Método 2 (Austro-Alemão). Foram mantidos as duas abordagens apesar de terem sido desenvolvidas com filosofias diferentes os objectivos eram os mesmos. Assim sendo, o Método 1 e o Método 2 são capazes do dimensionamento de uma viga-coluna, apesar do seu comportamento complexo à encurvadura.

O método 1 (Boissonnade et al., 2000, 2004, Maquoi et al., 2001) é mais complexo e contém um conjunto de fórmulas no sentido de propor critérios de interacção consistentes e precisos. Baseiam-se no aspecto teórico e as fórmulas foram preparadas para que cada coeficiente represente um único efeito e o método 2 é menos complexo e não tão trabalhoso, utilizando menor número de coeficientes. Os factores de interacção são derivados do comportamento elástico da viga-coluna à flexão com encurvadura (Boissonnade et al., 2006).

A avaliação da segurança de vigas-coluna é efectuada através de fórmulas de interacção que combinam várias acções, como o esforço axial (N) e os momentos actuantes (M_y e M_z). Nem sempre é possível considerar o factor económico, visto que no EC 3 é utilizado o Estado Limite Último, e neste estado o que interessa é a segurança que se sobrepõe ao factor económico. O EC 3 também tem regras na resistência ao fogo na parte 1-2 (CEN, 2005) que foram baseadas em resultados experimentais (Franssen et al., 1995, 1996) onde as fórmulas de dimensionamento não diferem muito da parte 1-1 numa primeira abordagem. Mas numa observação mais detalhada pode-se verificar que existem alterações significativas, desde os factores de redução, de imperfeição que dependem do módulo de elasticidade, do factor de imperfeição e da alteração de algum parâmetro e dos factores de interacção com outros princípios.

Existe a parte 1-4 (CEN, 2005) que tem regras da resistência à encurvadura por flexão ou torção lateral referente ao aço inoxidável. Neste caso à temperatura ambiente, em que existe uma semelhança das regras em relação à parte 1-1 do EC3 com as suas diferenças desde os factores de redução, de imperfeição bem como do módulo de elasticidade por se tratar de um material diferente. Apesar das diferenças, na parte 1-2 os aços carbono e inox são verificados com as mesmas fórmulas.

1.2. Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é comparar as formulações de dimensionamento de vigas-coluna que se encontram no EC3 (CEN, 2005) nas partes 1-1, 1-2 e 1-4. Para este estudo utilizar-se-á um perfil HEA 200 com vários comprimentos, desde 1 metro até 10 metros. Também se vai ter em conta o tipo de aço, que pode ser o aço carbono com a classe S275 ou o aço inoxidável com a classe 1,4301, o carregamento no perfil em y-y e z-z e por fim a temperatura a que está sujeito.

Assim de uma forma mais detalhada, será feito uma análise:

- Resistência do elemento em aço carbono à temperatura ambiente;
- Resistência do elemento em aço carbono a altas temperaturas;
- Resistência do elemento em aço inoxidável à temperatura ambiente;
- Resistência do elemento em aço inoxidável a altas temperaturas;

Estas comparações vão ser efectuadas com base na utilização dos métodos 1 e 2 que se encontram no EC3-1-1 e as mesmas fórmulas irão estender-se às partes 1-2 e 1-4. Na utilização dos métodos 1 e 2, tem-se o cuidado de utilizar os factores que pertencem a essas mesmas partes, tais como:

- Factores de redução;
- Curvas de encurvadura;
- Factores de imperfeição.

Em cada uma das partes correspondentes ao EC3, vai ser feito esta adaptação, para haver uma análise com as curvas analíticas que se encontram em vigor no EC3 e se existe alguma comparação possível.

1.3. Estruturação da tese

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos. No capítulo 1 é apresentada uma descrição geral, indicando de forma resumida o vai acontecer ao longo dos capítulos e métodos aplicados.

No capítulo 2, é feito o processo de atribuição de uma classe a um perfil utilizado e demonstra as diferenças que existe na classificação quando se tem em conta o tipo de aço bem como a temperatura utilizada.

No capítulo 3, demonstra a importância da classificação e esta vai interferir com a resistência de uma secção sujeita à flexão composta ou à flexão composta e desviada. Na resistência da secção é demonstrado que apenas depende das características geométricas e não da temperatura submetida ou do tipo de material.

No capítulo 4, é exposta a formulação analítica do elemento vigas-coluna baseada no EC3-1-1 pelos métodos 1 e 2 e adaptada para a parte 1-2 em que é efectuado uma análise comparativa depois. Inicialmente faz-se uma verificação da segurança de elementos em carbono sujeitos à flexão composta e desviada à temperatura ambiente e posteriormente com as respectivas adaptações de factores a altas temperaturas, a comparação das curvas dos métodos 1 e 2 com a curva analítica do EC3-1-2.

No capítulo 5, é exposta a formulação analítica do elemento vigas-coluna baseada no EC3-1-1 pelos métodos 1 e 2 e adaptada para a parte 1-4 e também para a parte 1-2 em que é efectuado uma análise comparativa depois. Inicialmente faz-se uma verificação da segurança de elementos em inox sujeitos à flexão composta e desviada à temperatura ambiente com as respectivas adaptações de factores da parte 1-4. E por fim as respectivas adaptações de factores a altas temperaturas, na comparação das curvas dos métodos 1 e 2 com a curva analítica do EC3-1-2.

Por fim, no capítulo 6 são expostas as conclusões sobre o trabalho elaborado e são apresentados possíveis desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Classificação da secção transversal

Capítulo 2 - Classificação da secção transversal

2.1. Considerações gerais.....	9
2.2. Classificação da secção pelo EC3-1-1	10
2.2.1. Secção com compressão.....	11
2.2.2. Secção com momento em y ou momento em z.....	12
2.2.3. Secção com compressão e momento em y.....	13
2.2.5. Secção com compressão e momento em z.....	15
2.2.6. Secção com compressão e momentos em y e z.....	16
2.2.7. Classificação da secção a altas temperaturas	17
2.3. Classificação da secção pelo EC3-1-4	17
2.3.1. Secção com compressão.....	19
2.3.2. Secção com momento em y ou momento em z.....	20
2.3.3. Secção com compressão e momento em y.....	20
2.3.5. Secção com compressão e momento em z.....	21
2.3.6. Secção com compressão e momentos em y e z.....	22
2.3.7. Classificação da secção a altas temperaturas	22
2.4. Conclusões	22

2.1. Considerações gerais

As vigas-coluna são um elemento importante nas estruturas de aço e podem ter classes diferentes entre os vários elementos que compõem a secção transversal (alma e banzo). Apesar de serem considerados da mesma classe, os pontos fortes das secções podem ser diferentes (Ryu et al., 2006). Em cada secção transversal as acções a actuar devem ser inferiores às acções resistentes, porque em termos de dimensionamento têm-se que prever que nenhum estado limite seja excedido. Para que isto seja possível deve-se considerar todas as situações nas cargas aplicadas e que são importantes na estabilidade da estrutura, sob o risco de haver colapso e/ou deformação.

Assim a classificação torna-se importante por existirem fenómenos de encurvadura de acordo com a sua rotação. A sua resistência não deve exceder o limite de elasticidade (CEN, 2005), porque existe um equilíbrio de forças e tensões que actuam antes que aconteçam fenómenos associados à plasticidade, como a instabilidade local ou mesmo a instabilidade global (Davies, 2000).

Por isso o EC3 (CEN, 2005), faz a definição das classes existentes para a secção, relacionada com a sua resistência e capacidade de rotação quando submetida a esforços axiais de compressão e vai depender das dimensões da secção e da cedência dos seus elementos, que podem ser internos (alma) ou salientes (banzo).

Este tipo de classificação tem em conta os fenómenos de encurvadura local de uma secção que considera 4 classes:

- Classe 1: As secções podem atingir a resistência plástica e têm capacidade de rotação suficiente para se formar uma rótula plástica;
- Classe 2: As secções podem atingir a resistência plástica mas não se pode garantir a capacidade de rotação suficiente para se formar uma rótula plástica;
- Classe 3: As secções podem atingir a resistência elástica;
- Classe 4: As secções não conseguem atingir sequer a resistência elástica ($\sigma_{\max} < f_y$), devido à ocorrência de fenómenos de encurvadura local.

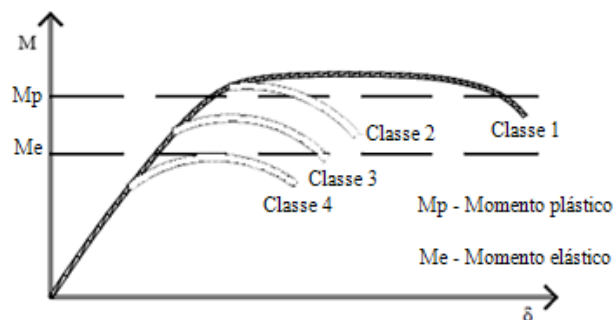


Figura 2. 1 - Comportamento das secções

2.2. Classificação da secção pelo EC3-1-1

Esta diferenciação é importante, para a utilização da tabela do EC3-1-1 (CEN, 2005), como evidencia a figura 2.2 para os elementos internos (esquerda) e para os elementos salientes (direita). Antes disso a sua classificação é feita através duma razão geométrica entre a uma parte da alma e a sua espessura (tabela 2.1) e uma parte do banzo e a sua espessura (tabela 2.2).

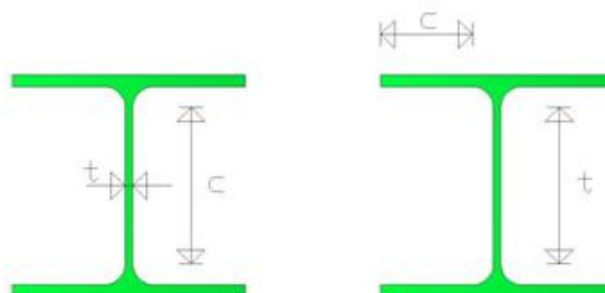


Figura 2. 2 - Esquerda: elemento interno; direita: elemento saliente

Elementos internos (alma)			
Classe	Parte sujeita à flexão	Parte sujeita à compressão	Parte sujeita à flexão e compressão
Distribuição de tensões			
1	$c/t \leq 72 \times \varepsilon$	$c/t \leq 33 \times \varepsilon$	$\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1}$
			$\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36 \times \varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83 \times \varepsilon$	$c/t \leq 38 \times \varepsilon$	$\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1}$
			$\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5 \times \varepsilon}{\alpha}$
3	$c/t \leq 124 \times \varepsilon$	$c/t \leq 42 \times \varepsilon$	$\psi > -1: c/t \leq \frac{42 \times \varepsilon}{0,67 + 0,33 \times \psi}$
			$\psi \leq -1: c/t \leq 62 \times \varepsilon \times (1 - \psi) \times \sqrt{(-\psi)}$

Tabela 2. 1 - Classificação de elementos internos (alma) (CEN, 2005)




Elementos salientes (banzo)			
Classe	Parte sujeita à flexão	Parte sujeita à compressão	Parte sujeita à flexão e compressão
Distribuição de tensões			
1	$c/t \leq 9 \times \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9 \times \varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9 \times \varepsilon}{\alpha \times \sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10 \times \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \times \varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10 \times \varepsilon}{\alpha \times \sqrt{\alpha}}$
3	$c/t \leq 14 \times \varepsilon$	$c/t \leq 21 \times \varepsilon \times \sqrt{K_\sigma}$	

Tabela 2. 2 - Classificação de elementos externos (banzo) (CEN, 2005)

Quando se trata de uma secção sujeita a flexão composta, o cálculo da classe não é imediata, dado que é preciso ter em conta a posição do seu eixo neutro para que se possa determinar outra variável, α e a classe da secção vai ser a maior das classes dos seus elementos comprimidos.

Considerando o perfil HEA200 e o aço S275, de acordo com as cargas que actuam, demonstra-se a sua classificação para cada caso de acordo com o EC3.

$$N_{Ed} \leq \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.1)$$

Nota: $\gamma_{M0} = 1,0$ sendo um factor parcial utilizado para secções transversais de qualquer classe.

2.2.1. Secção com compressão

De acordo com a figura 2.3, pode-se verificar o diagrama de tensões no perfil.

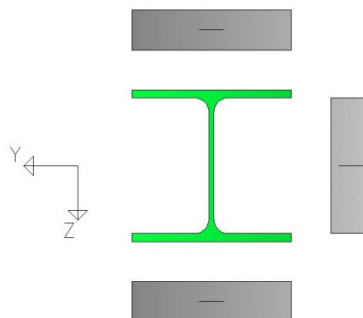


Figura 2. 3 - Diagrama de tensões – N

A classificação é feita de acordo com as tabelas 2.1 e 2.2:

- Esbelteza dos elementos c/t :

A classe da secção é determinada de acordo com as constantes demonstradas na figura 2.1.

Para o nosso exemplo (HEA200), seria para a alma:

$$\frac{c}{t} < 33 \times \varepsilon \quad (2.2)$$

- Parâmetro $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ (2.3)

Assume-se que o aço em questão é S275, e de acordo com a tabela 2.1, a alma pertence à classe 1.

Para o banzo, seria:

$$\frac{c}{t} < 9 \times \varepsilon \quad (2.4)$$

Conforme a tabela 2.2, o banzo pertence à classe 1 e nesse caso a secção transversal referida (HEA200) pertence à classe 1.

Para este tipo de acção a tabela do EC3, torna-se muito prática, visto que a sua classificação depende apenas da relação entre a altura da alma e sua espessura ou da relação duma parte do banzo e sua espessura. Assim para a sua classificação é verificar os quocientes obtidos e restringir aos valores máximos admitidos pelo EC3.

2.2.2. Secção com momento em y ou momento em z

De acordo com a figura 2.4, pode-se verificar o diagrama de tensões no perfil.

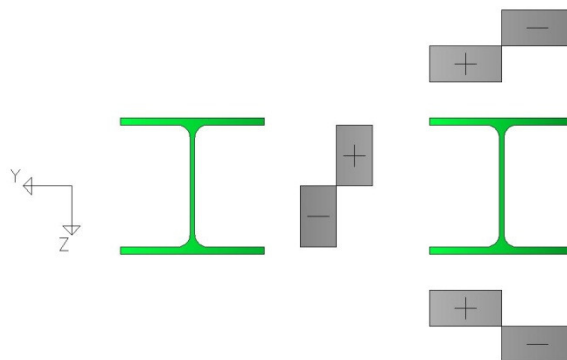


Figura 2. 4 - Esquerda: Diagrama de tensões - M_y ; direita: Diagrama de tensões - M_z

Para a alma (esquerda) seria:

$$\frac{c}{t} < 72 \times \varepsilon \quad (2.5)$$

De acordo com a tabela 2.1, a alma pertence à classe 1, enquanto a classificação do banzo é o mesmo procedimento da expressão 2.4 e assim a secção transversal referida (HEA200) pertence à classe 1 e a alma para o momento em z seria igual à expressão 2.2. Mais uma vez as tabelas do EC3 são práticas quando actuam no perfil o esforço axial ou a flexão isolados.

2.2.3. Secção com compressão e momento em y

De acordo com a figura 2.5, pode-se verificar o diagrama de tensões no perfil.

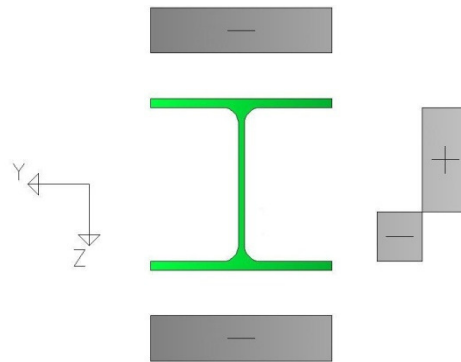


Figura 2. 5 - Diagrama de tensões - N+My

A classificação é feita de acordo com a tabela 2.1:

- Esbelteza dos elementos c/t depende de um factor α como demonstra a figura 2.6.

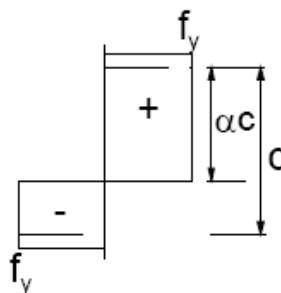


Figura 2. 6 - Parte da secção submetida à compressão e flexão

Para a determinação da classe da alma já não se trata de um processo directo, porque o factor α depende do comprimento da alma e da posição do eixo neutro. Mesmo após a determinação do valor, o EC3, não classifica imediatamente a classe, visto que:

- Para a classe 1:

quando:

$$\alpha > 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{396 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1} \quad (2.6)$$

e:

$$\alpha \leq 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{36 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.7)$$

- Para a classe 2:

quando:

$$\alpha > 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{456 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1} \quad (2.8)$$

e:

$$\alpha \leq 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{41,5 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.9)$$

- Para a classe 3, se nenhuma das condições anteriores servir então é necessário ter em conta a distribuição das tensões em partes (figura 2.7).

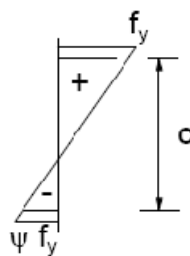


Figura 2. 7 - Distribuição das tensões em partes

quando:

$$\psi > -1 : \frac{c}{t} \leq \frac{42 \times \varepsilon}{0,67 + 0,33 \times \psi} \quad (2.10)$$

ou:

$$\psi \leq -1 : \frac{c}{t} \leq 62 \times \varepsilon \times (1 - \psi) \times \sqrt{(-\psi)} \quad (2.11)$$

No caso da expressão 2.11 é válida quando se verifica uma das seguintes condições:

- $\sigma \leq f_y$;
- $\varepsilon_y > \frac{f_y}{E}$.

Para o banzo seria de acordo com a expressão 2.4 da tabela 2.2, assim o banzo pertence à classe 1. Assim pode-se verificar que a tabela do EC3, apesar de ser possível classificar, não se trata de um processo directo em função das acções, visto que entram outras variáveis, tais como a determinação do eixo neutro e para a classe 3 é necessário ver o diagrama de tensões.

2.2.5. Secção com compressão e momento em z

De acordo com a figura 2.8, pode-se verificar o diagrama de tensões no perfil.

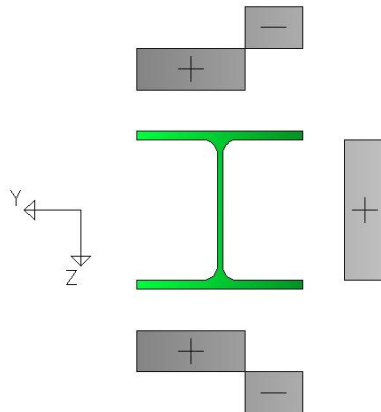


Figura 2. 8 - Diagrama de tensões - N+Mz

Para a alma seria de acordo com a expressão 2.5 da tabela 2.1, assim a alma pertence à classe 1. Na determinação da classe do banzo é preciso ter em conta o diagrama de tensões, porque o EC3 diferencia de acordo com a figura 2.9.

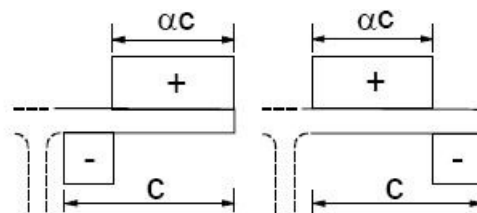


Figura 2. 9 - Esquerda: ponta à compressão; direita: ponta à tracção

Pelo diagrama da figura 2.9, trata-se do esquema à esquerda, em que o factor α depende do comprimento da alma e da posição do eixo neutro, então:

- Para a classe 1:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{9 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.12)$$

- Para a classe 2:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{10 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.13)$$

- Para a classe 3:

$$\frac{c}{t} \leq 21 \times \varepsilon \times \sqrt{K_{\sigma}} \quad (2.14)$$

Devido ao facto de um perfil de classe 3 ter a possibilidade de encurvadura por causa da sua rotação ser nula, é necessário ter em conta um outro factor, como aparece na expressão 3.15, K_{σ} . Este factor encontra-se descrito no EC3-1-5.

2.2.6. Secção com compressão e momentos em y e z

De acordo com a figura 2.10, pode-se verificar o diagrama de tensões no perfil.

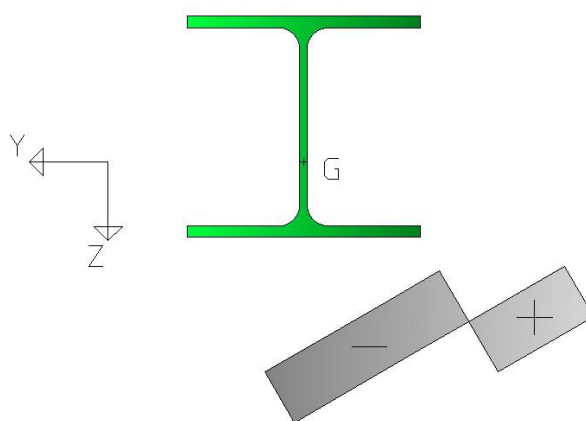


Figura 2. 10 - Diagrama de tensões - $N+My+Mz$

Para a determinação da classe da alma, acontece o mesmo que no ponto 2.2.3, porque o factor α depende do comprimento da alma e do eixo neutro (figura 2.6), logo não é imediato. Na determinação do banzo, mais uma vez, é necessário ter em conta o diagrama de tensões da figura 2.9. Apesar de a

classificação não ser directa pelo procedimento do EC3-1-1, é possível fazer uma classificação “mais directa” através de uns mapas. Ou seja, cada perfil teria um e assim seria possível avaliar o comportamento através de umas coordenadas de ângulos, tendo também em conta o tipo de aço (Rugarli, 2009).

2.2.7. Classificação da secção a altas temperaturas

Como foi referido anteriormente o EC3 classifica as secções em função de diversos aspectos:

- Resistência da secção;
- Capacidade de rotação;
- Dimensões dos seus elementos internos ou salientes.

O aço submetido a temperaturas elevadas sofre alterações nas suas propriedades mecânicas, o que implica uma menor resistência da tensão de cedência e também do módulo de elasticidade linear.

Tendo em conta as tabelas 2.1 e 2.2 que foram utilizadas na classificação da secção, agora há que ter em conta um novo limite dado pela expressão seguinte (CEN, 2005):

$$\varepsilon = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (2.15)$$

Logo a classificação utilizada anteriormente é válida para altas temperaturas, mas utilizando um valor reduzido de ε dado pela expressão 2.15.

2.3. Classificação da secção pelo EC3-1-4

Esta classificação vai diferir da anterior, porque o EC3 apresenta limites diferentes para o aço inoxidável. Para a utilização das tabelas do EC3-1-4 (CEN, 2006) é necessário considerar a figura 2.2 para os elementos internos (alma) e para os elementos externos (banzo).

Seguem-se as tabelas utilizadas para o aço inoxidável, neste caso a tabela 2.3 para os elementos internos e a tabela 2.4 para os elementos externos.

Elementos internos (alma)			
Classe	Parte sujeita à flexão	Parte sujeita à compressão	Parte sujeita à flexão e compressão
Distribuição de tensões			
1	$c/t \leq 56 \times \varepsilon$	$c/t \leq 25,7 \times \varepsilon$	$\alpha > 0,5 : c/t \leq \frac{308 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1}$
			$\alpha \leq 0,5 : c/t \leq \frac{28 \times \varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 58,2 \times \varepsilon$	$c/t \leq 26,7 \times \varepsilon$	$\alpha > 0,5 : c/t \leq \frac{320 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1}$
			$\alpha \leq 0,5 : c/t \leq \frac{29,1 \times \varepsilon}{\alpha}$
3	$c/t \leq 74,8 \times \varepsilon$	$c/t \leq 30,7 \times \varepsilon$	$c/t \leq 15,3 \times \varepsilon \times \sqrt{k_\sigma}$

Tabela 2. 3 - Classificação de elementos internos (alma) (CEN, 2006)

Elementos salientes (banzo)			
Classe	Parte sujeita à flexão	Parte sujeita à compressão	Parte sujeita à flexão e compressão
Distribuição de tensões			
1	$c/t \leq 10 \times \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \times \varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10 \times \varepsilon}{\alpha \times \sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10,4 \times \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,4 \times \varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4 \times \varepsilon}{\alpha \times \sqrt{\alpha}}$
3	$c/t \leq 11,9 \times \varepsilon$	$c/t \leq 18,1 \times \varepsilon \times \sqrt{k_\sigma}$	

Tabela 2. 4 - Classificação de elementos externos (banzo) (CEN, 2006)

Esta classificação só muda nos valores máximos admitidos para cada classe, porque de resto trata-se de um raciocínio semelhante. Também se pode verificar que tratando-se de uma secção sujeita a flexão composta, o cálculo da classe não é imediata, dado que é preciso ter em conta a posição do seu

eixo neutro para que se possa determinar outra variável, α e a classe da secção vai ser a maior das classes dos seus elementos comprimidos.

Considerando o perfil HEA200 e de acordo com as cargas que actuam, demonstra-se a sua classificação para cada caso de acordo com o EC3-1-4.

2.3.1. Secção com compressão

De acordo com a figura 2.3 tem-se o diagrama de tensões apresentado e a sua classificação é feita com as tabelas 2.3 e 2.4. Vai ser necessário considerar:

- Esbelteza dos elementos c/t :

Para o nosso exemplo (HEA200), seria para a alma:

$$\frac{c}{t} < 25,7 \times \varepsilon \quad (2.16)$$

- Parâmetro $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \times \frac{E}{210000}}$ (2.17)

Assume-se que o aço em questão é o aço inoxidável 1,4301, e verificando a tabela 2.3, a alma pertence à classe 1.

Para o banzo, seria:

$$\frac{c}{t} < 10 \times \varepsilon \quad (2.18)$$

Conforme a tabela 2.4, o banzo pertence à classe 1 e nesse caso a secção transversal referida (HEA200) pertence à classe 1.

Para este tipo de acção a tabela do EC3, torna-se muito prática, visto que a sua classificação depende apenas da relação entre a altura da alma e sua espessura ou da relação duma parte do banzo e sua espessura. Assim para a sua classificação é verificar os quocientes obtidos e restringir aos valores máximos admitidos pelo EC3.

2.3.2. Secção com momento em y ou momento em z

De acordo com a figura 2.4 tem-se o diagrama de tensões apresentado e a sua classificação é:

Para a alma (esquerda) seria:

$$\frac{c}{t} < 56 \times \varepsilon \quad (2.19)$$

Conforme a tabela 2.3, a alma pertence à classe 1, enquanto a classificação do banzo é o mesmo procedimento da expressão 2.18 e assim a secção transversal referida (HEA200) pertence à classe 1 e a alma para o momento em z seria igual à expressão 2.16. Mais uma vez as tabelas do EC3 são práticas quando actuam no perfil o esforço axial ou a flexão isolados.

2.3.3. Secção com compressão e momento em y

Considerando a figura 2.5, esta apresenta o diagrama de tensões no perfil e a sua classificação é feita conforme a tabela 2.3:

- Esbelteza dos elementos c/t depende de um factor α como demonstra a figura 2.6.

Para a determinação da classe da alma já não se trata de um processo directo, porque o factor α depende do comprimento da alma e da posição do eixo neutro. Mesmo após a determinação do valor, o EC3, não classifica imediatamente a classe, visto que:

- Para a classe 1:

quando:

$$\alpha > 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{308 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1} \quad (2.20)$$

e:

$$\alpha \leq 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{28 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.21)$$

- Para a classe 2:

quando:

$$\alpha > 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{320 \times \varepsilon}{13 \times \alpha - 1} \quad (2.22)$$

e:

$$\alpha \leq 0,5 : \frac{c}{t} \leq \frac{29,1 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.23)$$

- Para a classe 3, se nenhuma das condições anteriores servir então é necessário ter em conta a distribuição das tensões em partes (figura 2.7):

quando:

$$\frac{c}{t} \leq 15,3 \times \varepsilon \times \sqrt{k_{\sigma}} \quad (2.24)$$

Para o banzo seria de acordo com a expressão 2.18 da tabela 2.4, assim o banzo pertence à classe 1. Conforme pode-se verificar a tabela do EC3, apesar de ser possível classificar, não se trata de um processo directo em função das acções, visto que entram outras variáveis, tais como a determinação do eixo neutro e para a classe 3 é necessário ver o diagrama de tensões.

2.3.5. Secção com compressão e momento em z

De acordo com a figura 2.8, esta apresenta o diagrama de tensões no perfil e a sua classificação é feita conforme as tabelas 2.3 e 2.4.

Para a alma seria de acordo com a expressão 2.19 da tabela 2.3, assim a alma pertence à classe 1. Na determinação da classe do banzo é preciso ter em conta o diagrama de tensões, porque o EC3 diferencia de acordo com a figura 2.9. Pelo diagrama da figura 2.9, trata-se do esquema à esquerda, em que o factor α depende do comprimento da alma e da posição do eixo neutro, então:

- Para a classe 1:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{10 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.25)$$

- Para a classe 2:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{10,4 \times \varepsilon}{\alpha} \quad (2.26)$$

- Para a classe 3:

$$\frac{c}{t} \leq 18,1 \times \varepsilon \times \sqrt{K_\sigma} \quad (2.27)$$

Como já foi referido anteriormente de um perfil de classe 3 ter a possibilidade de encurvadura por causa da sua rotação ser nula, é necessário ter em conta um outro factor, como aparece na expressão 2.27, K_σ . Este factor encontra-se descrito no EC3-1-5.

2.3.6. Secção com compressão e momentos em y e z

Considerando a figura 2.10, esta apresenta o diagrama de tensões no perfil e para a determinação da classe da alma, acontece o mesmo que no ponto 2.3.3, porque o factor α depende do comprimento da alma e do eixo neutro (figura 2.6), logo não é imediato. Na determinação do banzo, mais uma vez, é necessário ter em conta o diagrama de tensões da figura 2.9.

2.3.7. Classificação da secção a altas temperaturas

O EC3 classifica as secções em função de diversos aspectos:

- Resistência da secção;
- Capacidade de rotação;
- Dimensões dos seus elementos internos ou salientes.

O aço submetido a temperaturas elevadas sofre alterações nas suas propriedades mecânicas, o que implica uma menor resistência da tensão de cedência e também do módulo de elasticidade linear.

Tendo em conta as tabelas 2.3 e 2.4 que foram utilizadas na classificação da secção, agora há que ter em conta um novo limite dado pela expressão seguinte (CEN, 2005):

$$\varepsilon = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y} \times \frac{E}{210000}} \quad (2.28)$$

Logo a classificação utilizada anteriormente é válida para altas temperaturas, mas utilizando um valor reduzido de ε dado pela expressão 2.28.

2.4. Conclusões

A análise da verificação da resistência da secção é importante por existirem fenómenos de encurvadura. Verifica-se que as propriedades mecânicas do aço variam em função da temperatura. Existe a necessidade de haver limites definidos para a classificação tanto ao tipo de aço, bem como da temperatura utilizada.

Capítulo 3

Verificação da secção transversal

Capítulo 3 - Verificação da secção transversal

3.1.Considerações gerais.....	25
3.2. Verificação da resistência da secção em aço carbono.....	25
3.2.1. Compressão.....	25
3.2.2. Flexão simples.....	26
3.2.3. Flexão Composta.....	27
3.2.4. Flexão composta e desviada.....	30
3.3. Verificação da resistência da secção em aço carbono ao fogo	34
3.4. Verificação da resistência da secção em aço inoxidável.....	34
3.5. Verificação da resistência da secção em aço inoxidável ao fogo	34
3.6. Conclusões	34

3.1.Considerações gerais

A importância da classe da secção transversal reflecte-se na escolha das expressões existentes no EC3 (CEN, 2005) para o dimensionamento de vigas-coluna. Neste capítulo apresentam-se as expressões regulamentares utilizadas no dimensionamento das vigas-coluna sujeitas à encurvadura lateral.

3.2. Verificação da resistência da secção em aço carbono

Apresenta-se o comportamento da resistência da secção submetida a várias acções, desde a flexão composta (N+M) à flexão composta e desviada. É necessário antes ter um conhecimento da sua capacidade de resistência e depois pensar numa viga-coluna como um elemento na sua análise de resistência.

3.2.1. Compressão

De acordo com a figura 2.3, esta apresenta uma secção transversal sujeita ao esforço axial de compressão e a sua resistência deve ser dada:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.1)$$

Como foi dito a sua análise é feita de acordo com a sua classificação, para que se tenha em conta a sua resistência à compressão.

Para as classes 1,2 e 3:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.2)$$

Na classe 4 devido à possibilidade de encurvadura local, é necessário usar uma área efectiva (A_{eff}). Isto porque existem fenómenos de instabilidade local que impedem o desenvolvimento da capacidade elástica resistente da secção. Neste caso o EC3 (CEN, 2005) diz qual a zona mais sensível de provocar instabilidade como se vê na figura 3.1:

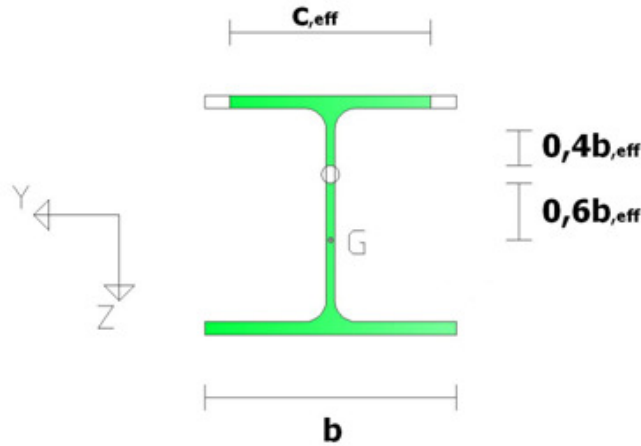


Figura 3. 1 - Área efectiva de um perfil de classe 4

Para a classe 4:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.3)$$

Após a sua definição, vai haver um deslocamento do eixo neutro para baixo devido ao desaparecimento da zona determinada sujeita a grande instabilidade e ao comprimento do banzo superior.

3.2.2. Flexão simples

Tendo uma secção transversal, na figura 2.4, sujeita a uma flexão simples (M_y ou M_z), sua resistência deve ser dada:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.4)$$

O procedimento utilizado no EC3 difere de acordo com a classe da secção transversal, como se pode constatar. No caso de a secção pertencer às classes 1 e 2, o momento resistente é o momento plástico da secção, ou seja, o momento necessário para se formar uma rótula plástica, por isso:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.5)$$

No caso de a secção pertencer à classe 3, o momento resistente é o momento elástico da secção, considerando o módulo de flexão elástico:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.6)$$

Por fim, na secção de classe 4 a sua resistência $\sigma_{max} < f_y$, considerando o módulo de flexão plástico:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.7)$$

3.2.3. Flexão Composta

O EC3-1-1, considera que a resistência à encurvadura no eixo y-y para valores reduzidos do esforço axial as expressões 3.11 e 3.12 e deve-se considerar as várias etapas descritas, mas caso não se verifique utiliza-se a expressão 3.8. Conforme a figura 2.5 sujeita a flexão composta (N+M) os procedimentos considerados são os seguintes:

- No eixo forte (y-y):

para:

$$N_{Ed} > 0,25 \times N_{pl} \quad (3.6)$$

ou:

$$N_{Ed} \geq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{m0}} \quad (3.7)$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \times \frac{1-n}{1-0,5 \times a} \text{ mas } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} \quad (3.8)$$

onde:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (3.9)$$

e:

$$a = \frac{A - 2 \times b \times t_f}{A} \text{ mas } a \leq 0,5 \quad (3.10)$$

para:

$$N_{Ed} \leq 0,25 \times N_{pl} \quad (3.11)$$

e:

$$N_{Ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{m0}} \quad (3.12)$$

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \quad (3.13)$$

Verificar como varia a relação $M_{y,Ed} / M_{pl,y}$ no eixo forte desta peça em função da acção do esforço axial $N_{Ed} / N_{pl,Rd}$, na figura 3.2 visando as considerações anteriores e para ter a sua evolução da variação da resistência na presença de flexão composta.

Resolvendo as expressões 3.6 e 3.8 (tendo em conta 3.7), fica:

$$\frac{M_{N,y}}{M_{pl,y}} = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl}}}{1 - 0,5 \times a} \quad (3.14)$$

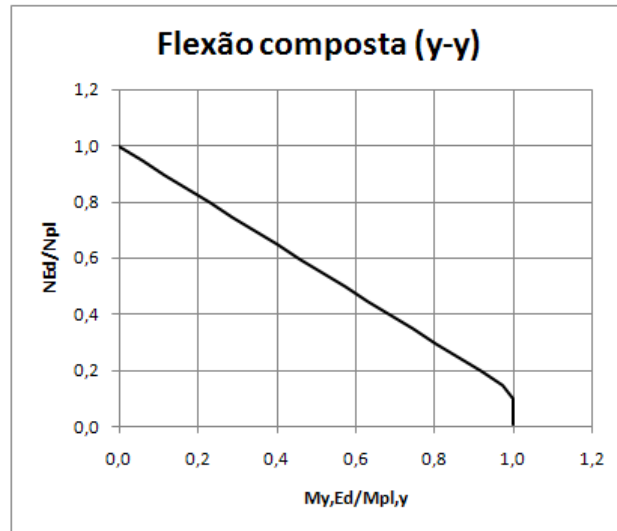


Figura 3. 2 - Gráfico da variação da flexão composta no eixo y-y

O gráfico da figura 3.2 representa a resistência da secção do perfil HEA 200 no eixo forte, enquanto o gráfico da figura 3.3 demonstra a resistência da secção no eixo fraco. Estes limites foram

determinados automaticamente através de uma folha de cálculo e utilizou-se um outro perfil para testar a folha de cálculo (figura 3.4).

O EC3-1-1, considera que a resistência à encurvadura no eixo z-z para valores reduzidos do esforço axial as expressões 3.15 ou a 3.16 para a expressão 3.17, mas caso não de não verificar utiliza-se a expressão 3.20. Conforme a figura 2.5 sujeita a flexão composta (N+M) os procedimentos considerados são os seguintes:

No eixo fraco (z-z):

$$n \leq a \quad (3.15)$$

ou:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{m0}} \quad (3.16)$$

$$M_{N,Z,Rd} = M_{pl,Z,Rd} \quad (3.17)$$

$$n > a \quad (3.18)$$

e:

$$N_{Ed} \geq \frac{h_w \times t_w \times f_y}{\gamma_{m0}} \quad (3.19)$$

$$M_{N,Z,Rd} = M_{pl,Z,Rd} \times \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \quad (3.20)$$

Verificar como varia a relação $M_{z,Ed} / M_{pl,z}$ no eixo fraco desta peça em função da acção do esforço axial $N_{Ed} / N_{pl,Rd}$, na figura 3.3, visando as considerações anteriores e para ter a sua evolução da variação da resistência na presença de flexão composta.

Resolvendo a fórmula, fica:

$$\frac{M_{N,Z,Rd}}{M_{pl,Z,Rd}} = 1 - \left(\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - a}{1-a} \right)^2 \quad (3.21)$$

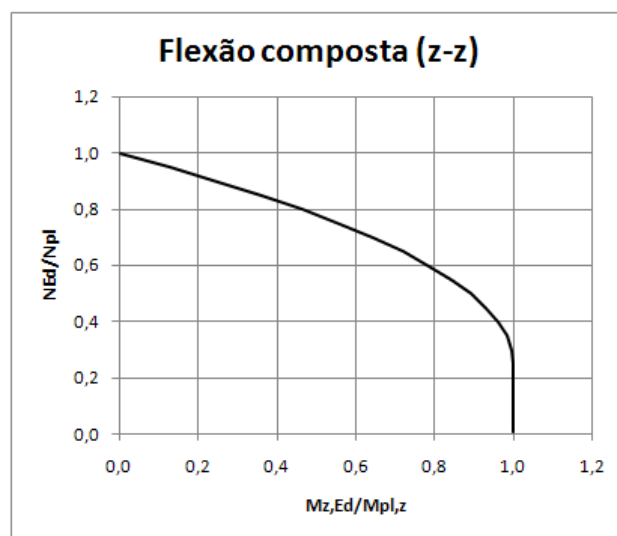


Figura 3. 3 - Gráfico da variação da flexão composta no eixo z-z

O gráfico da figura 3.3 apresenta uma resistência da secção diferente do gráfico da imagem 3.2, neste caso deixa de apresentar uma recta ao longo do gráfico e apresenta uma curva. Mudando apenas o perfil utilizado para o HEA 300, testou-se a folha de cálculo para resistência da secção. Claro que existe as suas diferenças como seria de esperar, porque se trata de dois perfis diferentes mas obteve-se o seguinte gráfico da figura 3.4 (Manfred et al., 1994).

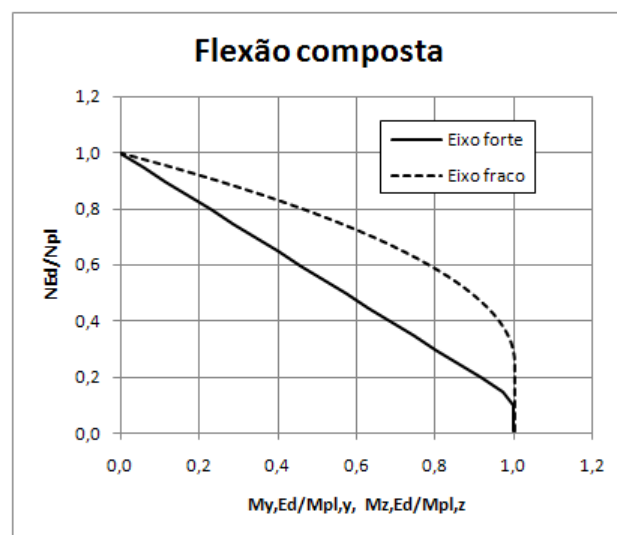


Figura 3. 4 - Gráfico da variação da flexão composta (HEA 300)

3.2.4. Flexão composta e desviada

Numa viga, figura 2.10, submetida à flexão composta e desviada, os procedimentos considerados no EC3-1-1 para o seu dimensionamento que considera:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1 \quad (3.22)$$

O efeito da força axial está incluído em ambos os momentos, logo o efeito de cada uma das forças não pode ser facilmente visto (Lindner, 2003). Logo para o cálculo da carga de ruptura real é necessário ter em conta:

- Tensões residuais;
- Comportamento do perfil no regime elástico-plástico;
- Deslocamento do centro de corte e o centro de gravidade (Vinnakot, 1977).

Como se trata de um perfil metálico HE200A:

$$\alpha = 2;$$

$$\beta = 5 \times n, \text{ mas } \beta \geq 1.$$

O valor de n é calculado de acordo com a expressão 3.9.

O EC3-1-1, nos eixos y-y e z-z tem em consideração as expressões 3.22 com, 3.1, 3.8, 3.9 e a 3.17, tendo obtido:

Com as limitações das expressões 3.11, 3.12 e 3.16 ou 3.15:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y}} = \sqrt{1 - \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z}} \right)^\beta} \quad (3.23)$$

Com as limitações das expressões 3.6 ou 3.7 e 3.16 ou 3.15:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y}} = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl}}}{1 - 0,5 \times a} \times \sqrt{1 - \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z}} \right)^\beta} \quad (3.24)$$

Com as limitações das expressões 3.11, 3.12, 3.19 e 3.18:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y}} = \sqrt[1]{1 - \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z}} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - a}{1 - a} \right)^2}}^{\beta} \quad (3.25)$$

Com as limitações das expressões 3.6 ou 3.7 e 3.19 e 3.18:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y}} = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl}}}{1 - 0,5 \times a} \times \sqrt[1]{1 - \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z}} \times \frac{1}{1 - \left(\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - a}{1 - a} \right)^2}}^{\beta} \quad (3.26)$$

Aqui, na elaboração do gráfico da variação dos momentos em y-y e z-z, foi preciso visar várias limitações do EC3, desde a relação entre n e a , o valor de β e de N_{Ed} e depois conjugar estes factores todos de modo a obter-se o gráfico da figura 3.5 e ver os limites da resistência à secção em função de n .

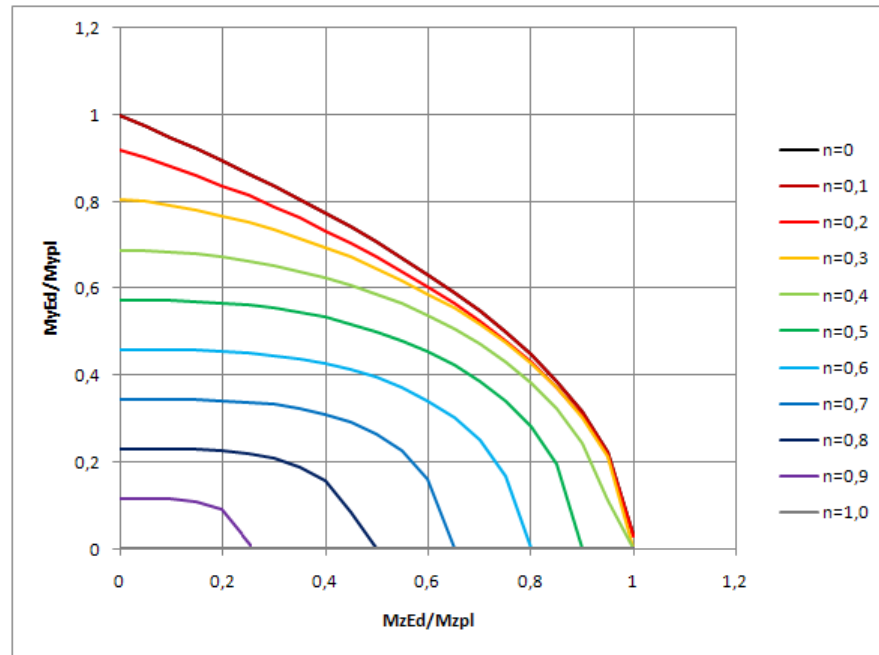


Figura 3. 5 - Flexão composta e desviada

O gráfico da figura 3.6 permite uma melhor leitura dos dados, mas é possível verificar o comportamento da secção em 3D tendo em conta os gráficos das figuras 3.2, 3.3 e 3.5:

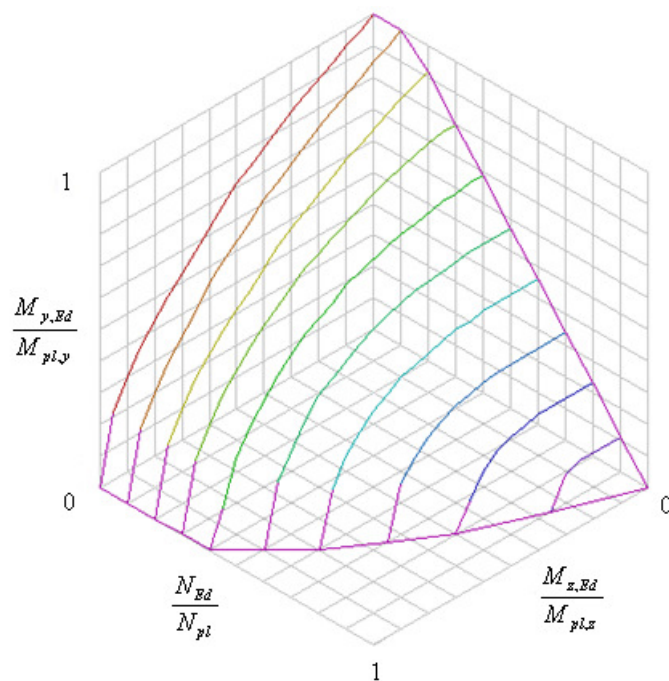


Figura 3. 6 - Secção do perfil HEA200 com flexão composta e desviada

Numa observação muito geral é possível verificar os gráficos anteriores, enquanto as curvas obtidas são em 3D em relação às do gráfico 3.6. Assim sendo consegue-se visualizar as seguintes curvas:

- $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$ a curva corresponde ao gráfico da figura 3.2;
- $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ a curva corresponde ao gráfico da figura 3.3;
- $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ as curvas correspondem ao gráfico da figura 3.5.
-

3.3. Verificação da resistência da secção em aço carbono ao fogo

A variação da carga actuante continua a variar entre 0 e 1, porque esta também vai diminuir e assim as curvas da resistência da secção do perfil HEA200 com a classe de aço carbono S275, correspondem às mesmas curvas do ponto 3.2.

3.4. Verificação da resistência da secção em aço inoxidável

Como as expressões da flexão composta, da flexão composta e desviada dependem apenas de parâmetros geométricos, visto o perfil ser o mesmo (HEA200), as curvas da secção continuam a ser as mesmas do ponto 3.2.

3.5. Verificação da resistência da secção em aço inoxidável ao fogo

Sucede a mesma situação do ponto 3.3 e 3.4 e com isto as expressões do ponto 2.3 mantêm-se para aqui permitindo que as curvas da resistência da secção sejam iguais ao ponto 3.2.

3.6. Conclusões

A resistência de uma secção depende apenas das características geométricas da secção transversal, independentemente do tipo de material ou do tipo de temperatura que se encontra sujeito a secção.

Capítulo 4

Verificação do elemento em aço carbono

Capítulo 4 - Verificação do elemento em aço carbono

4.1. Considerações gerais.....	37
4.2. Procedimentos à temperatura ambiente	37
4.2.1. Elemento à compressão.....	37
4.2.2. Elemento sujeito à flexão	41
4.2.2.1. Secções laminadas e soldadas equivalentes	43
4.2.3. Elemento sujeitos à flexão composta com compressão	47
4.2.3.1. Método 1	48
4.2.3.2. Método 2	50
4.3. Comparação das formulações em aço carbono à temperatura ambiente	52
4.3.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	52
4.3.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	54
4.3.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	56
4.3.4. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$	61
4.3.5. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,8$	62
4.4. Utilização das curvas ao fogo no aço carbono	65
4.4.1. Elemento comprimido a altas temperaturas	65
4.4.2. Elemento sujeito à flexão com encurvadura lateral a altas temperaturas	67
4.4.3. Elemento sujeito à flexão composta com compressão	69
4.4.3.1. Método 1	70
4.4.3.2. Método 2	70
4.5. Comparação das formulações em aço carbono ao fogo	71
4.5.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	71
4.5.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	72
4.5.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	74
4.6. Conclusões	75

4.1. Considerações gerais

As vigas-coluna são um elemento estrutural que sujeita a determinadas acções apresenta problemas de instabilidade, desde a encurvadura por flexão e a encurvadura com torção lateral. No EC3-1-1, existem duas formulações para o dimensionamento de vigas-coluna à temperatura ambiente. As formulações são descritas como o método 1 e o método 2, que foram desenvolvidas através de dois grupos, o Franco-Belga para o método 1 (Villette et al., 2000) e o Autro-Alemão para o método 2 (Greiner et al., 2006).

4.2. Procedimentos à temperatura ambiente

4.2.1. Elemento à compressão

Tem em consideração um elemento, na figura 4.1 sujeita ao esforço axial de compressão e a sua resistência à encurvadura de acordo com o EC3:

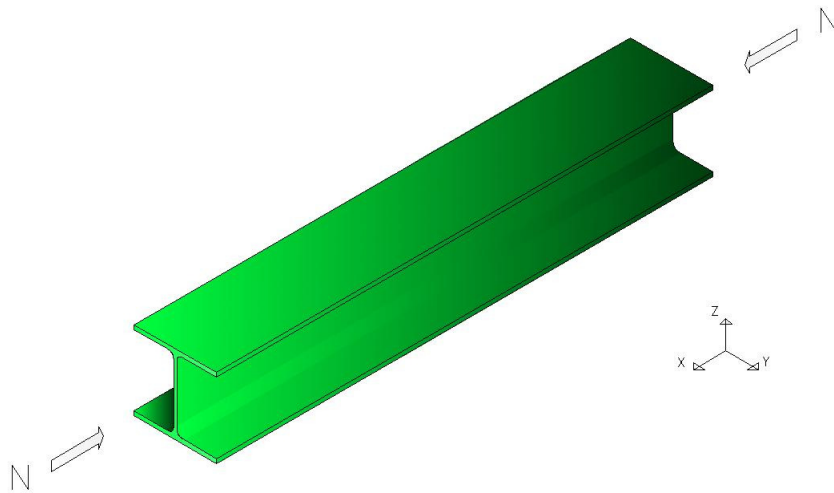


Figura 4. 1 - Elemento sujeito à compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1,0 \quad (4.1)$$

Existem vários factores que alteram a resistência de um elemento quando submetido à compressão e este depende da qualidade do aço que define a resistência à ruptura e a sua ductilidade.

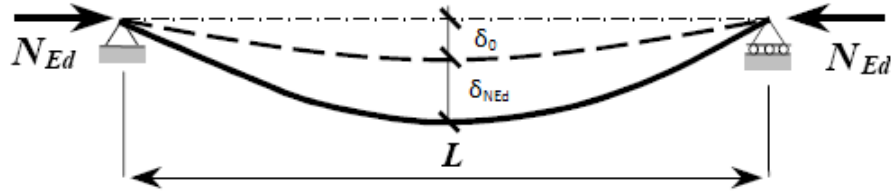


Figura 4. 2 - Elemento simplesmente apoiado com imperfeição inicial

Um dos factores pode ser as tensões residuais que acontecem devido ao arrefecimento desigual no elemento de aço (figura 4.3) e podem apresentar alterações de modo a influenciar de forma negativa o comportamento. Apresenta acréscimos de gradientes de tensões que podem atingir uma magnitude que pode provocar deformação plástica (Hurber et al., 2008). O EC3 (CEN, 2005) tem em consideração este factor como se pode verificar nas expressões 4.5 e 4.9.

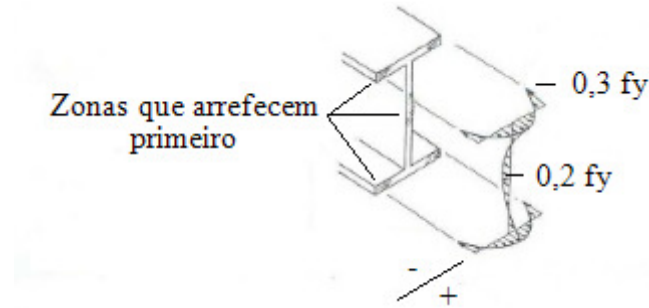


Figura 4. 3 - Diagrama de tensões residuais (Dowling et al., 1988)

Inicialmente apareceu uma expressão que considera as tensões residuais. Apresenta-se assim a fórmula clássica de Ayrton-Perry, para a análise global das barras submetidas à compressão (ESDEP, 2010):

$$(s_{cr} - s_b) \times (f_y - s_b) = h \times s_{cr} \times s_b \quad (4.2)$$

h: representa os defeitos, como as tensões residuais.

Sendo possível ficar:

$$(1 - \bar{N} \times \bar{\lambda}^2) \times (1 - \bar{N}) = \eta \times \bar{N} \quad (4.3)$$

A expressão 3.2 foi o princípio para o EC3 em que (Maquoi e Rondal, 1978):

$$\eta = \alpha \times \sqrt{\lambda_0^2 - 0,04} \quad (4.4)$$

Sendo mais tarde corrigido pelos autores e conhecida como é nos dias de hoje no EC3:

$$\eta = \alpha \times (\bar{\lambda} - 0,2) \quad (4.5)$$

Nota: apesar de não ter referido, o h da expressão 4.2 é o n das expressões 4.3, 4.4 e 4.5.

Por isso é considerado um factor de redução para prevenir os aspectos referidos, logo para as secções de classe 1, 2 ou 3 a sua análise (expressão 4.6), na determinação das suas curvas de encurvadura, como demonstra a figura 3.3, mas na classe 4 a expressão 4.7 é necessário ter em conta área efectiva (A_{eff}) devido à possibilidade de encurvadura local:

Para as classes 1,2 e 3:

$$N_{Rd} = \frac{\chi \times A \times f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.6)$$

Para a classe 4:

$$N_{Rd} = \frac{\chi \times A_{eff} \times f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.7)$$

Nota: $\gamma_{M0} = 1,0$ sendo um factor parcial utilizado para elementos estruturais sujeitos à instabilidade.

Considerando um elemento com secção transversal constante ao longo do seu desenvolvimento e sujeito a um esforço axial de compressão, o factor de redução é:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (4.8)$$

onde:

$$\phi = 0,5 \times \left[1 + \alpha \times (\bar{\lambda}^2 - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (4.9)$$

e:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \quad (4.10)$$

Nota: o perfil utilizado ao longo do trabalho é HEA200 para as devidas relações e o aço é S275.

O comprimento de encurvadura, segundo a carga crítica de Euler seria de acordo com a figura 4.4, no qual não existem imperfeições. Como foi dito anteriormente, as imperfeições existem e o EC3 (CEN, 2005) tem as suas curvas que foram obtidas através de ensaios reais (figura 4.4).

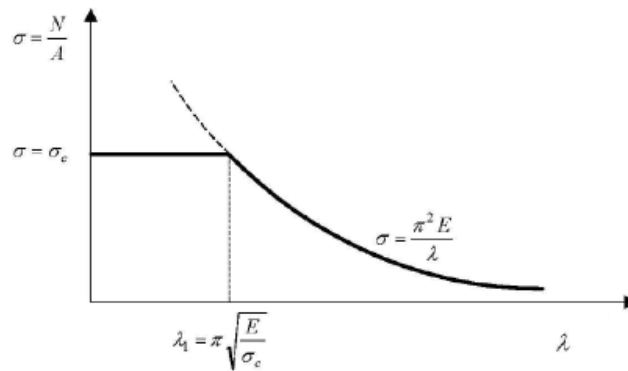


Figura 4. 4 - Comportamento de uma coluna, segundo Euler

O factor de imperfeição α vai ser escolhido de acordo com a tabela 4.1 e este vai depender:

- Tipo de secção transversal (forma);
- Da espessura das placas que constituem a secção transversal;
- Classe de aço que contém.

Secção transversal	limites		Encurvadura em relação ao eixo	Curva de encurvadura
				S235; S275; S355; S420
	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y	a
			z-z	b
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b
			z-z	c
	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b
			z-z	c
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d
			z-z	d

Tabela 4. 1 - Selecção da curva de encurvadura para perfis I laminados

Tendo em conta os critérios enumerados, vai haver os seguintes factores de imperfeição:

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Factor de imperfeição (α)	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabela 4. 2 - Factores de imperfeição para curvas de encurvadura

Para se determinar a carga crítica N_{cr} é calculado de acordo com a expressão seguinte (Euler), mas considerando o factor de imperfeição:

$$N_{cr,i} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{(\alpha_i \times L)^2} \quad (4.11)$$

O coeficiente α_i vai condicionar o comprimento do elemento na determinação do comprimento de encurvadura, porque este vai depender das suas condições de apoio e segundo o eixo correspondente.

Verificando as condições anteriores, o EC3-1-1 apresenta várias curvas de encurvadura que podem ser aplicadas tendo em conta a situação verificada.

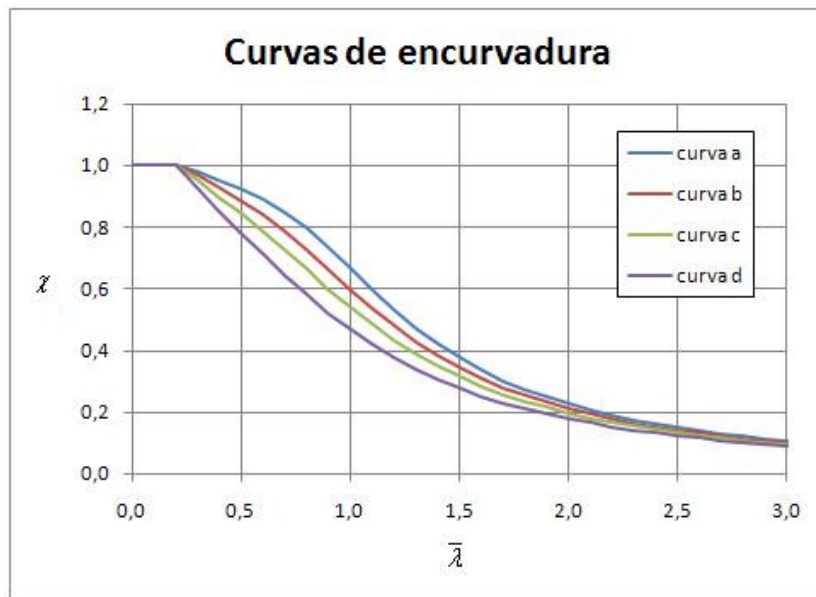


Figura 4. 5 - Gráfico das Curvas de encurvadura

4.2.2. Elemento sujeito à flexão

Esta viga, figura 4.6, é sujeita à flexão simples (M), e a sua resistência à encurvadura lateral de acordo com o EC3 tem de ser:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0 \quad (4.12)$$

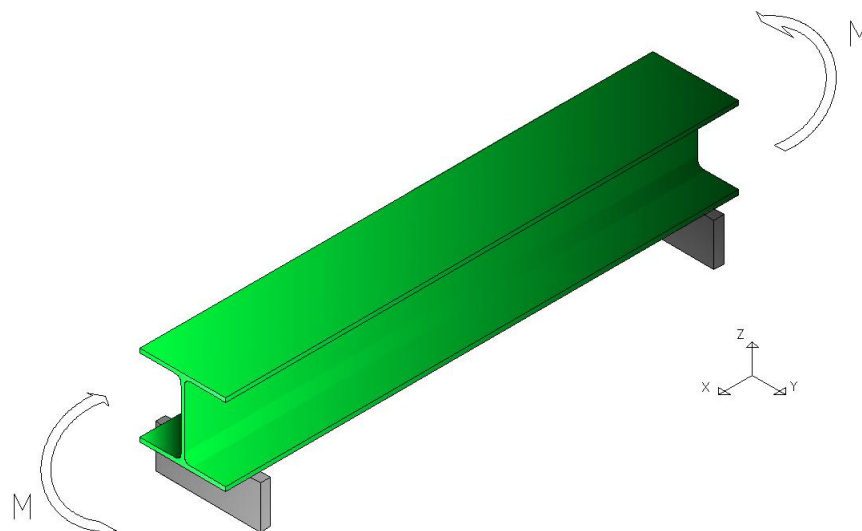


Figura 4. 6 - Viga sujeita à flexão

É preciso ter a noção do comportamento da viga com flexão plana, com a possibilidade de haver encurvadura, isto porque os banzos comprimidos não têm um bom comportamento e a viga-coluna poderá estar sujeita à encurvadura lateral como demonstra a figura 4.7:

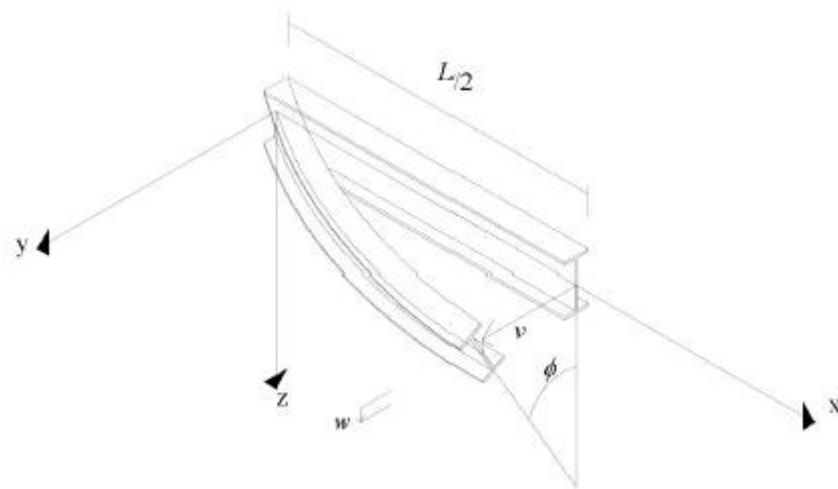


Figura 4. 7 - Viga sujeita à encurvadura lateral (Lopes, 2009)

É considerado apenas para secções de classe 1, 2 ou 3 a sua análise para a determinação da sua curva de encurvadura:

$$M_{Rd} = \chi_{LT} \times w_y \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.13)$$

Neste caso e segundo o EC3, é preciso ter em conta a classe do perfil, visto que:

$$w_y \begin{cases} w_{pl,y} & \text{para secções transversais de classe 1 e 2} \\ w_{el,y} & \text{para secções transversais de classe 3} \\ w_{eff,y} & \text{para secções transversais de classe 4} \end{cases}$$

Para a determinação do factor de redução, χ_{LT} , existem dois procedimentos possíveis, um para o caso geral, e outro, para secções laminadas ou secções soldadas equivalentes, ambos no EC3-1-1. Apesar de haver dois procedimentos, neste trabalho, é apenas utilizado o último referido. Esta decisão cabe-se pelo facto de ser um procedimento mais económico e mais próximo da realidade devido à introdução de um factor que irá ser explicado mais adiante.

4.2.2.1. Secções laminadas e soldadas equivalentes

O EC3-1-1 aborda o método para as secções laminadas e soldadas equivalentes, em que o factor de redução é através da expressão 4.14:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \times \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ com } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (4.14)$$

em que:

$$\phi_{LT} = \frac{1}{2} [1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \times \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (4.15)$$

e:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} \quad (4.16)$$

O EC3, define que os factores $\bar{\lambda}_{LT,0}$ e β são limitados para um valor máximo de 0,4 e um valor mínimo de 0,75 respectivamente. Para a expressão 4.15, o factor de imperfeição vem de acordo com a tabela 4.3:

Secções	Limites	Curva de encurvadura
I laminadas	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Tabela 4. 3 - Secções laminadas e soldadas equivalentes

Esta tabela apresenta curvas de encurvadura que são as mesmas da tabela 4.1 (excepto a curva *a*), apesar de se tratar do factor de imperfeição com encurvadura lateral (α_{LT}), logo os valores são os mesmos da tabela 4.2.

A diferença existente nos dois procedimentos, tem a ver com esta alteração, como se pode ver na expressão 4.17. Na verificação da resistência de elementos sujeitos à flexão, em vez de se ter a situação mais desfavorável, agora existe vários diagramas de momentos em função da carga que actua como demonstra a tabela 4.4. Este tipo de procedimento já era usual noutros regulamentos (Trahair et al., 2001) e como foi dito anteriormente, tem sido feito um grande desenvolvimento através de investigações recentes e material de vários códigos para o EC3 (CEN, 2005).

$$\chi_{LT, \text{mod}} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq 1 \quad (4.17)$$

onde:

$$f = 1 - 0,5 \times (1 - K_c) \times [1 - 2 \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \leq 1 \quad (4.18)$$

Esta função f , de acordo com a expressão 4.18, vai visar os vários tipos de carregamento existentes na viga, visto que o factor K_c varia como demonstra a tabela 4.4. A vantagem deste método é uma maior aproximação à realidade e com isto traz uma maior economia no seu dimensionamento.

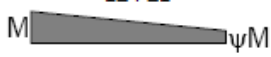


Diagrama do momento flector	k_c
$-1 \leq \psi \leq 1$ 	$\frac{1}{1,33 - 0,33 \psi}$
	0,86
	0,94

Tabela 4. 4 - Factores de correcção

Para resolver a expressão 4.16, existe um factor que é o momento crítico elástico e apesar de não constar no EC3, poderá ser encontrado noutras bibliografias (Lindner, 2003; Lopes, 2009; et al) através da expressão 4.19:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(K_z L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{K_z}{K_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(K_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 Z_g - C_3 Z_j)^2} - C_2 Z_g + C_3 Z_j \right] \quad (4.19)$$

A expressão 4.19 tem vários factores que têm que ser considerados de acordo a situação em que se encontra a viga. Factores como k_z e k_w variam:

- 0,5 para fixação completa;
- 0,7 fixado numa extremidade e livre na outra;
- 1,0 para nenhuma fixação.

O k_z refere à rotação do plano e pode ser determinado da mesma maneira que o factor α na determinação do comprimento de encurvadura aos elementos comprimidos. O k_w refere à deformação final da viga, caso contrário é sempre 1,0.

O módulo de elasticidade transversal, na expressão 4.20:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (4.20)$$

O factor I_t corresponde à inércia de torção enquanto factor I_w corresponde ao empenamento. Hoje em dia já é possível retirar estes valores (I_t e I_w), num catálogo comercial como a Arcelor (Arcelor).

No caso dos coeficientes C_1 , C_2 e C_3 , vão depender do carregamento e dos apoios a que a viga está sujeita e para $K=1,0$ o valor de C_1 é de acordo com a tabela 4.5:






Diagrama do momento flector	C_1
$\Psi = 1$ 	1,00
$\Psi = 0$ 	1,77
$\Psi = -1$ 	2,60
Carga concentrada 	1,35
Carga distribuída 	1,12

Tabela 4. 5 - Coeficientes de determinação do momento crítico elástico

Nota: a ausência de C_2 e C_3 , deve-se à situação assumida, forças aplicadas no centro de corte e momentos aplicados nas extremidades.

O factor Z_g é a distância entre o centro de corte e a aplicação da carga, como se vê na expressão 4.21:

- Z_a é a posição da aplicação da carga;
- Z_s é a posição do centro de corte.

$$Z_g = Z_a - Z_s \quad (4.21)$$

O EC3 apresenta duas propostas para o dimensionamento de vigas-coluna, na parte 1-1, à temperatura ambiente, em que são denominadas de Método 1 e Método 2. Estas metodologias foram desenvolvidas por dois grupos diferentes, o Franco-Belga para o método 1 (Boissonnade, 2004) e Austro-Alemão para o método 2 (Greiner, 2000).

Estas duas propostas acabam por uma metodologia diferente, mas com o mesmo objectivo comum, o de dimensionar com precisão e economia um perfil.

4.2.3. Elemento sujeitos à flexão composta com compressão

Admitindo que a viga seguinte, na figura 4.8, se encontra sujeita à encurvadura lateral:

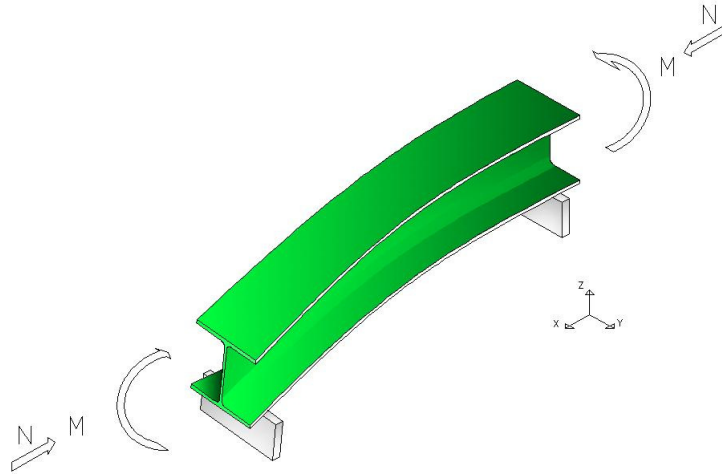


Figura 4. 8 - Viga sujeita a encurvadura com torção

O EC3, apresenta duas expressões, em que a expressão 4.22 representa o efeito de encurvadura do momento no eixo y-y e a expressão 4.23 o efeito de encurvadura do momento no eixo z-z:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = \left(1 - \frac{1}{\chi_y} \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - k_{yz} \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}} \right) \times \frac{\chi_{LT}}{k_{yy}} \quad (4.22)$$

e:

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}} = \left(1 - \frac{1}{\chi_z} \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - k_{zy} \times \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} \right) \times \frac{\chi_{LT}}{k_{zz}} \quad (4.23)$$

As expressões 4.22 e 4.23 têm vários factores que consistem:

- Factores de redução χ_z , χ_y e χ_{LT} ;
- O esforço axial de compressão resistente é dado pela expressão 4.24:

$$N_{pl} = A \times f_y \quad (4.24)$$

- Os momentos resistentes são dados pelas expressões 4.25 e 4.26:

$$M_{y,pl} = W_{pl,y} \times f_y \quad (4.25)$$

$$M_{z,pl} = W_{pl,z} \times f_y \quad (4.26)$$

No caso dos factores de interacção k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} e k_{zz} podem ser determinados de acordo com o método escolhido para a resolução das expressões 4.22 ou 4.23.

O EC3 considera que os efeitos da força axial e os momentos de flexão são linearmente somados, enquanto os efeitos não-lineares são explicados por factores de interacção (Boissonnade et al., 2006). A utilização deste conceito permite uma maior facilidade na avaliação dos efeitos individuais. Foram criados duas formulações que encontram-se em anexo no EC3-1-1, designados por Método 1 e Método2 e a diferença principal é a determinação dos factores de interacção. Enquanto no Método 1 existe coeficientes específicos para os efeitos estruturais o Método 2 trata de utilizar factores de interacção mais compactos. Apesar das diferenças, ambos os métodos partiram do mesmo princípio para o qual foram criados, a resistência à encurvadura com torção lateral.

4.2.3.1. Método 1

O método 1 é mais trabalhoso e contém um maior número de fórmulas de modo a obter uma precisão alta. Sendo possível calcular cada fenómeno físico através de um factor. Os factores de interacção para perfis das classes 1 e 2, através do método 1 (grupo Franco-Belga) de acordo com as propriedades plásticas da secção transversal, assume a flexão composta e os factores de interacção, com encurvadura lateral (C_{mLT}), são determinados de acordo com as seguintes expressões:

$$k_{yy} = C_{my} \times C_{mLT} \times \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \times \frac{1}{C_{yy}} \quad (4.27)$$

$$k_{yz} = C_{mz} \times \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \times \frac{1}{C_{yz}} \times 0,6 \times \sqrt{\frac{W_z}{W_y}} \quad (4.28)$$

$$k_{zy} = C_{my} \times C_{mLT} \times \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \times \frac{1}{C_{zy}} \times 0,6 \times \sqrt{\frac{W_y}{W_z}} \quad (4.29)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \times \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \times \frac{1}{C_{zz}} \quad (4.30)$$

O coeficiente de momento equivalente no eixo y-y, C_{my} é determinado pela expressão 4.31, enquanto o coeficiente de momento equivalente no eixo z-z é igual (expressão 4.32):

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \times a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \times a_{LT}} \quad (4.31)$$

$$C_{mz} = C_{mz,0} \quad (4.32)$$

O factor C_{mLT} vem de acordo com a expressão 4.33:

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \times \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} \geq 1 \quad (4.33)$$

Os factores de momento são determinados de acordo com as expressões 4.34 e 4.35:

- Para o eixo y-y:

$$C_{my,0} = 0.79 + 0.21 \times \psi_y + 0.36 \times (\psi_y - 0.33) \times \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \quad (4.34)$$

- Para o eixo z-z:

$$C_{mz,0} = 0.79 + 0.21 \times \psi_z + 0.36 \times (\psi_z - 0.33) \times \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \quad (4.35)$$

Estes factores consideram um diagrama de momentos de acordo com a figura 4.9:

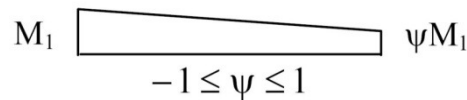


Figura 4. 9 - diagrama de momento

Os coeficientes μ_y e μ_z são fornecidos no anexo A do EC3-1-1 e os coeficientes C_{yy} , C_{yz} , C_{zy} e C_{zz} , foram obtidos por meios de calibração numérica e também se encontram no mesmo anexo. Estes coeficientes representam a interacção elástico-plástica, entre os momentos de 1ª ordem e o esforço axial.

Em relação aos módulos de flexão, estes podem ser determinados pelas seguintes expressões:

- $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1.5 \quad (4.36)$

$$\bullet \quad w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1.5 \quad (4.37)$$

Os coeficientes C_{yy}, C_{yz}, C_{zy} e C_{zz} dependem das esbeltezas adimensionais $\bar{\lambda}_0$, uma vez que os elementos mais esbeltos não conseguem desenvolver a mesma interacção entre esforço axial e momento flector. Com os efeitos de instabilidade, o comportamento pode variar significativamente em função do tipo de secção e estes coeficientes dependem do factor de momento equivalente c_{mi} , dado que o elemento não desenvolve a mesma resistência elastico-plástica para diferentes tipos de carregamento.

O valor de n_{pl} é dado pela expressão 4.38:

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \quad (4.38)$$

As cargas críticas (Euler):

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_y}{I_y^2} \quad (4.39)$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_z}{I_z^2} \quad (4.40)$$

É apoiado na teoria elástica de 2ª ordem no plano e foi passado para 3D, com a ideia de manter-se o mais rigoroso possível e quando não o foi possível, usaram-se ensaios numéricos para a calibração dos factores.

4.2.3.2. Método 2

A metodologia utilizada pelo grupo Austro-Alemão é baseada no conceito de factores globais, logo a determinação dos factores de interacção é um processo mais simples. Apesar da base ou do princípio ser o mesmo existem diferenças, mas em termos de valores finais não existe grande disparidade de valores. Logo os factores de interacção são definidos pelas seguintes expressões para as classes 1 e 2:

$$k_{yy} = C_{my} \times \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times \frac{N_{pl}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{my} \times \left(1 + 0,8 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times \frac{N_{pl}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (4.41)$$

$$k_{yz} = 0,6 \times k_{zz} \quad (4.42)$$

para $\bar{\lambda}_z < 0,4$:

$$k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \times \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl}} \quad (4.43)$$

para $\bar{\lambda}_z \geq 0,4$:

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1 \times \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl}} \right] \geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{pl}} \right] \quad (4.44)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \times \left(1 + (2 \times \bar{\lambda}_z - 0,6) \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times \frac{N_{pl}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{mz} \times \left(1 + 1,4 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times \frac{N_{pl}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (4.45)$$

Nota: apesar de haver mais fórmulas, apenas retratou-se as que se adequam ao perfil HEA200 e classes 1 e 2.

Foi criado uma folha de cálculo na elaboração de gráficos para o estudo comparativo das formulações de dimensionamento de vigas-coluna metálicas. Para comprovar a veracidade da mesma, comparou-se com um gráfico que se encontra no TC8 (Boissonnade et al., 2006) através da introdução dos parâmetros que eram possíveis controlar, tais como:

- Escolha do perfil a utilizar;
- O tipo de aço;
- A classe do aço;
- Comprimento de encurvadura;
- Tipo de carregamento em y-y e z-z.

Após a introdução dos dados a folha estava automaticamente programada para a execução do mesmo. Na figura 4.10, considerou-se o perfil IPE500, aço carbono S235 com um comprimento de encurvadura de 4,10 m.

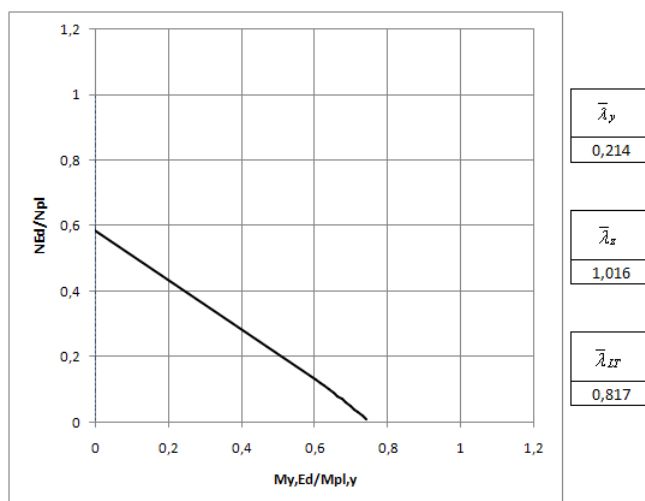


Figura 4. 10 - Viga-coluna com encurvadura lateral para $\psi_y=1$ a 20°C

Trata-se de uma curva do método 2, sujeita à flexão composta (N+My). A escolha do perfil, bem como do comprimento de encurvadura foi para que os valores das esbeltezas adimensionais fossem os mesmos e o método 2 converge para os mesmos valores que $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$. Não se trata de uma recta linear, mas sim de uma curva e tem o mesmo tipo de comportamento verificado no TC8.

4.3. Comparação das formulações em aço carbono à temperatura ambiente

Foi analisada uma viga-coluna em aço carbono, sujeita a uma carga distribuída ($\psi_y = \psi_z = 1$) em toda a sua secção. As seguintes figuras apresentam uma comparação dos métodos 1 e 2 (EC3-1-1) descritos neste capítulo em que existe uma variação do comprimento de encurvadura.

4.3.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta, sendo possível verificar os seus comportamentos.

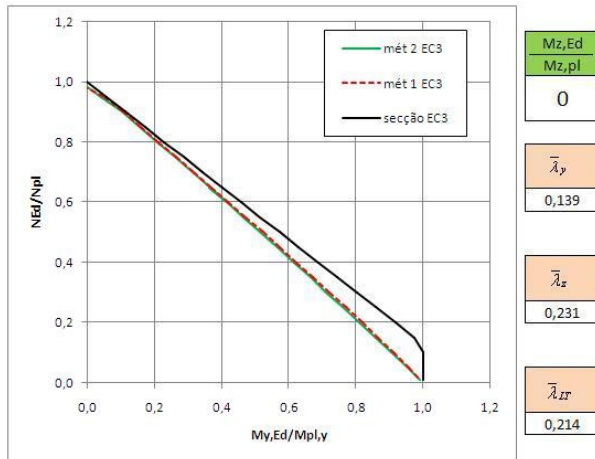


Figura 4.11 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

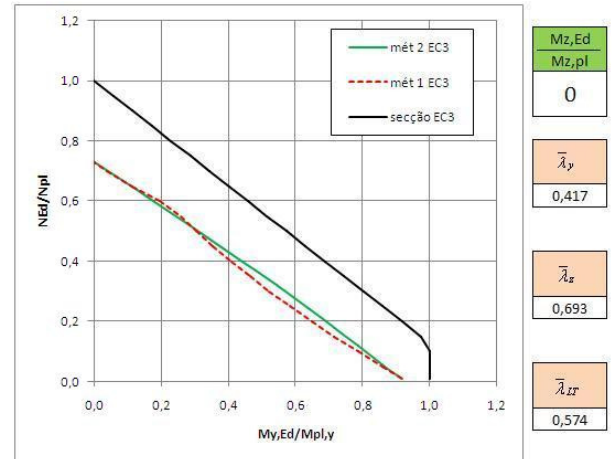


Figura 4.12 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

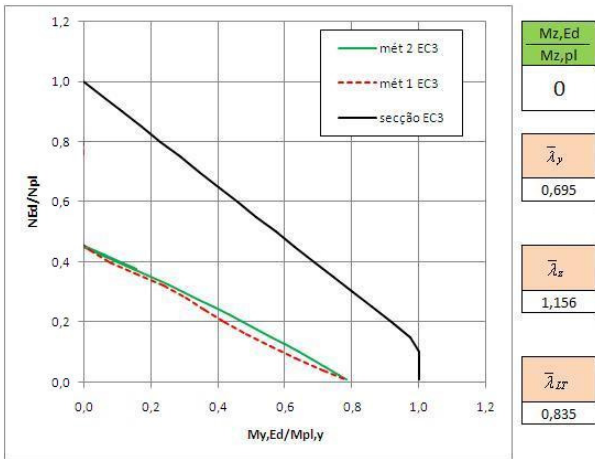


Figura 4.13 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

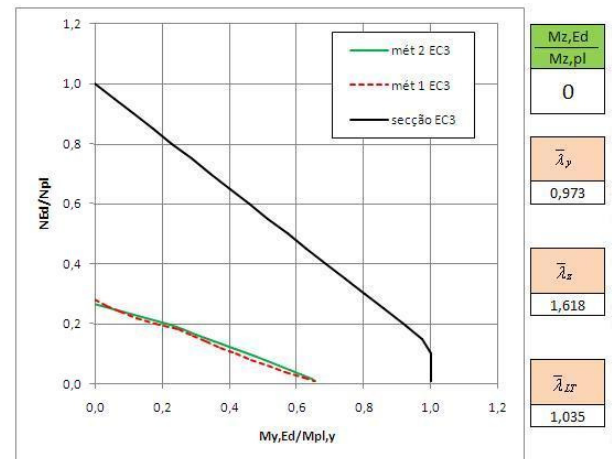


Figura 4.14 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

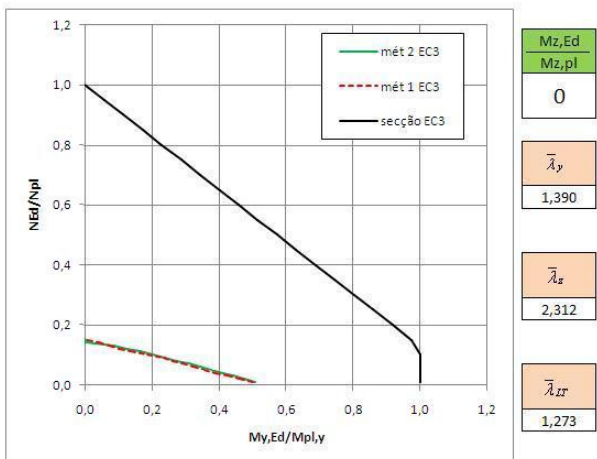


Figura 4.15 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

Nas figuras 4.11 a 4.15 os métodos 1 e 2 estão sujeitos a uma flexão composta ($N+My$) e o comportamento das curvas é muito parecido entre elas. Ou seja, os métodos 1 e 2 convergem para

$N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ por se tratar de uma flexão composta. Em relação à “curva” da secção permanece no mesmo sítio porque esta não depende do comprimento de encurvadura mas sim do momento em z-z, como se pode verificar no capítulo 3.

4.3.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta e desviada, sendo possível verificar uma maior diferença entre eles.

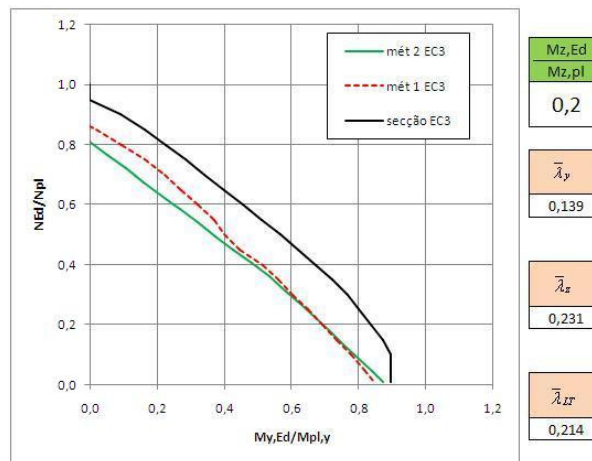


Figura 4. 16 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

A primeira diferença que se pode constatar na figura 4.16 é a curva da secção, esta mudou em relação às figuras anteriores e os métodos 1 e 2 deixaram de convergir para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ por se tratar de uma flexão composta e desviada. Numa observação simples pode verificar-se a existência de um afastamento do método 1 do método 2 entre os pontos 0 e 0,45 do eixo $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$. Acontece isso, porque entre esses pontos do eixo $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$ é definido pela expressão 4.23 (z-z) e no resto do eixo é definido pela expressão 4.22. Apesar de haver também uma mudança de expressão no método 2 ($M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,36$) esta é mais suave e torna-se “invisível” da expressão 4.23 (z-z) para expressão 4.22 (y-y). Isto porque os factores de interacção em z-z começam a diferir como se pode verificar para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$, as curvas são definidas pela expressão 4.23 (método 1: $k_{zz} = 0,633$; $k_{zy} = 0,486$ e método 2: $k_{zz} = 0,887$; $k_{zy} = 0,831$).

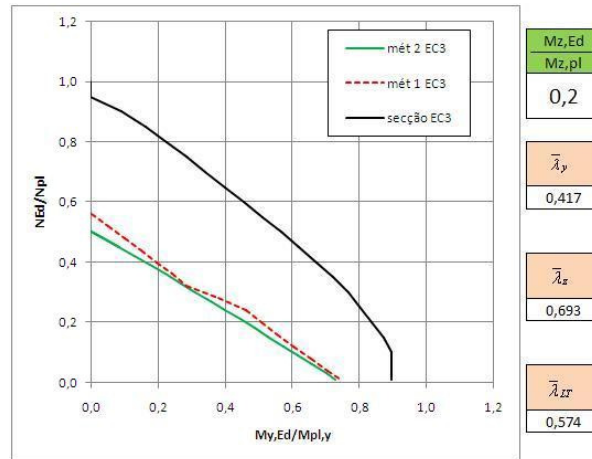


Figura 4. 17 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

Mais uma vez se verifica um afastamento ligeiro dos métodos 1 e 2 em vários pontos do gráfico da figura 4.17 e a curva do método 1 não tem o mesmo comportamento que a do método 2. No método 1 transição da mudança da expressão 4.23 (z-z) para a expressão 4.22 (y-y) é visível e acontece para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,32$, por isso aquela mudança de inclinação apesar do método 2 fazer também a transição.

A figura 4.18 apresenta um gráfico com os mesmos parâmetros que a figura 4.17, excepto no comprimento de encurvadura e verifica-se um comportamento muito idêntico em ambos os métodos, ou seja, sem haver grande variação ao longo das curvas.

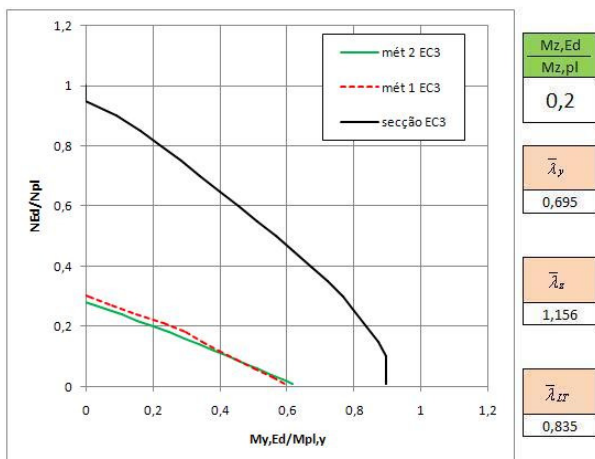


Figura 4. 18 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

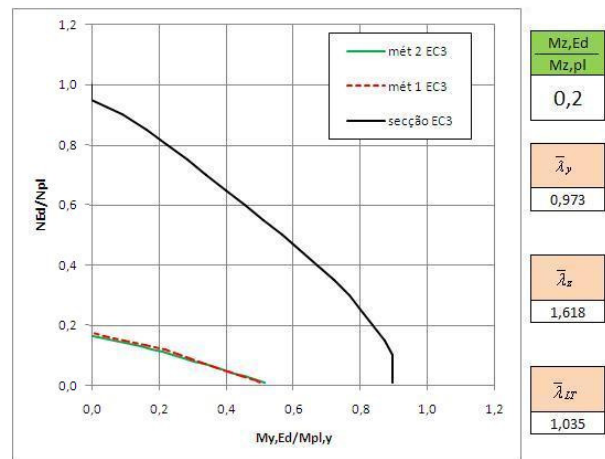


Figura 4. 19 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

Na figura 4.19, as curvas dos métodos 1 e 2 mudam em relação à figura 4.16, converge para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$. Se as expressões utilizadas são as mesmas, é preciso ver o que difere e neste caso são os factores de interacção muito idênticos. Enquanto o método 2 é definido pela expressão 4.23 (z-z), o método 1 passa por uma transição ($M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,16$), começa com a

expressão 4.23 (z-z) e acaba com a expressão 4.22 (y-y) como acontecia na figura 4.16. Logo a semelhança de valores dos factores de interacção são importantes como se verifica para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ da figura 3.19 (método 1: $k_{zz} = 1,853$; $k_{zy} = 1,024$ e método 2: $k_{zz} = 1,878$; $k_{zy} = 0,916$).

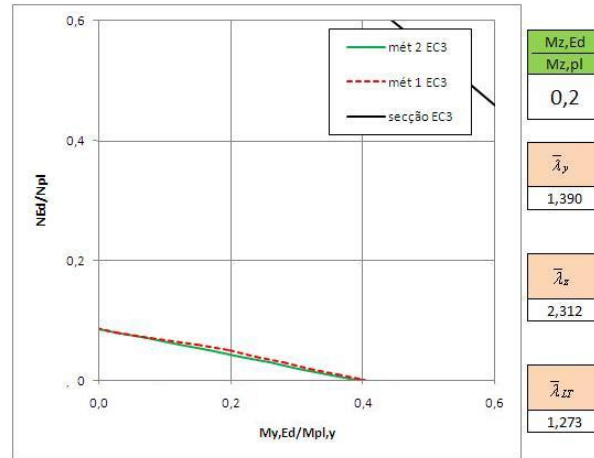


Figura 4. 20 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

Nesta última figura, a 4.20 demonstra as curvas do método 1 e 2 e o comportamento entre é muito parecido entre elas e até convergem para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$. Os limites de segurança para a encurvadura definidos pelos métodos encontram-se muito longe da resistência da própria secção.

4.3.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$

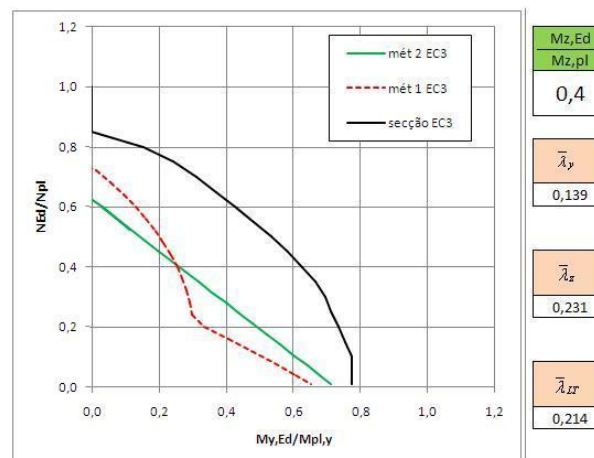


Figura 4. 21 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

A figura 4.21 apresenta uma curva bastante irregular pelo método 1, visto serem duas curvas bastante diferentes pelos dois métodos. A curva do método 1 é definida em todo gráfico pela expressão 4.23 (z-z) o mesmo sucedendo à curva do método 2. A questão é que o método 2 apresenta

praticamente uma recta, sem grandes oscilações. A figura 4.22 apresenta os métodos 1 e 2 num gráfico com eixos diferentes (M_z e M_y).

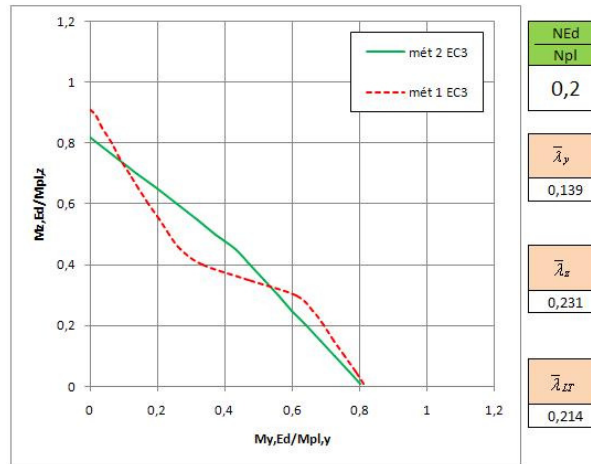


Figura 4. 22 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $N_{Ed}/N_{pl} = 0,2$

Pela análise aos gráficos das figuras 4.21 e 4.22 torna-se evidente que as curvas diferem bastante e não seria algo a esperar. Escolhendo um ponto comum a ambas as figuras, o $N_{Ed}/N_{pl} = 0,2$ pode-se constatar valores totalmente diferentes. Tanto no método 1 como no método 2, as suas curvas foram definidas pela expressão 4.23 (z-z), e se formos a comparar os factores de interacção entre os métodos vê-se uma grande diferença para $N_{Ed}/N_{pl} = 0,2$ (método 1: $k_{zz} = 1,546$; $k_{zy} = 0,534$ e método 2: $k_{zz} = 0,972$; $k_{zy} = 0,831$). Esta variação está nesta diferença e se escolhermos alguns pontos da figura 3.20, utilizando a expressão 4.23 justifica esta diferença.

Para $n = 0,01$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,724 - 1,759 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 2,631 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,203 - 1,228 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,203 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Para $n = 0,2$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,873 - 1,911 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 2,895 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,203 - 1,228 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,170 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Para $n = 0,4$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,931 - 1,970 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 2,228 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,203 - 1,228 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,136 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Se repararmos os valores dos métodos diferem bastante e comparando as expressões de cada ponto, verifica-se no método 1 o factor a multiplicar por N_{Ed}/N_{pl} é sempre inferior ao factor a multiplicar por $M_{z,Ed}/M_{z,pl}$ enquanto no método 2 verifica o contrário. Isto acontece, porque o método 1 apresenta em todos os pontos referidos o factor de interacção (k_{zz}) com valores bastante superiores.

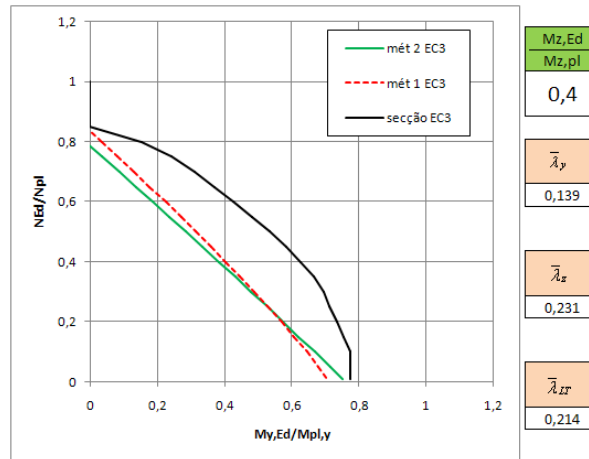
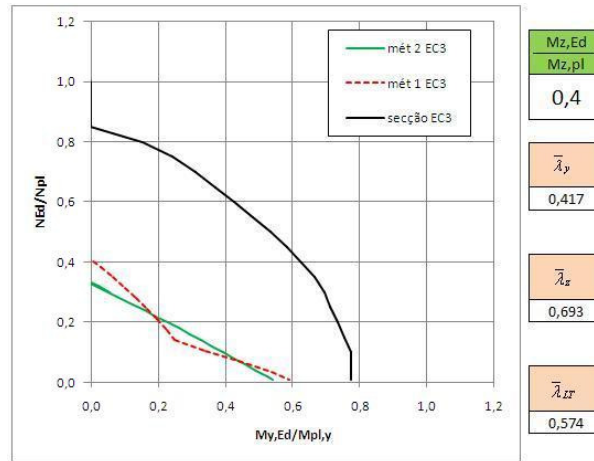
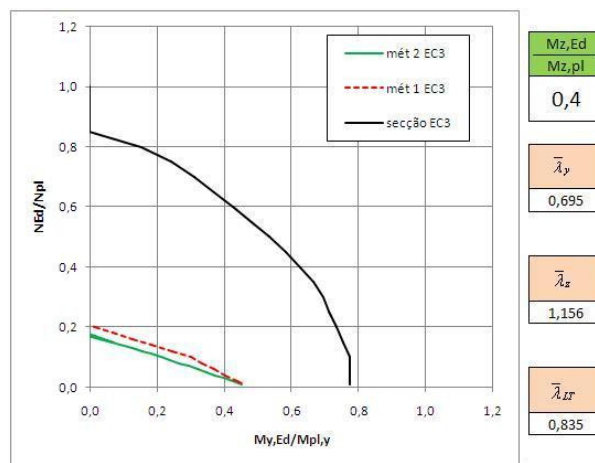


Figura 4. 23 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

Se fizermos uma base de comparação entre o gráfico da figura 4.21 e o gráfico da figura 4.23, reparamos no comportamento das curvas do método 1 e do método 2 serem distintos nos dois gráficos. Quando um elemento está sujeito à encurvadura lateral é necessário considerar as expressões 4.22 (y-y) e 4.23 (z-z), mas neste caso apenas teve-se em conta a expressão 4.22 do eixo forte. É apenas um raciocínio e caso a encurvadura fosse limitada por esta expressão, as curvas seriam regulares, os factores de interacção são muito idênticos para qualquer ponto, como por exemplo: $N_{Ed}/N_{pl} = 0,6$ (método 1: $k_{yy} = 0,951$; $k_{yz} = 0,467$ e método 2: $k_{yy} = 0,963$; $k_{yz} = 0,550$).


 Figura 4. 24 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

A figura 4.24 continua a apresentar uma diferença nas curvas dos dois métodos, principalmente na curva do método 1, embora não seja uma curva tão irregular como a verificada na figura 4.21. Ambas as curvas são definidas pela expressão 4.23 (z-z) e os factores de interacção continuam a diferir nos métodos aplicados. Na comparação destes gráficos com o da figura 4.25 acontece uma aproximação da curva do método 1 com a curva do método 2.


 Figura 4. 25 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

A curva do método 2 foi definida pela expressão 4.23 (z-z), enquanto a curva do método 1 passa por uma transição ($M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,24$), inicialmente pela expressão 4.23 (z-z) para a expressão 4.22 (y-y). Mas como não existe grande variação nas curvas e de acordo com vários pontos comuns entre os dois métodos vamos comparar as expressões (expressão 4.22 para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} > 0,24$ e expressão 4.23 para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} \leq 0,24$ no caso do método 1).

Para $n = 0,01$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,786 - 0,995 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,792 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,802 - 1,744 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,827 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Para $n = 0,1$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,677 - 0,857 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,719 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,802 - 1,791 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,077 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Para $n = 0,15$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,161 - 2,524 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,559 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,837 - 1,819 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,223 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Se repararmos os valores dos métodos, apesar das suas diferenças e comparando as expressões de cada ponto, verifica-se no factor a multiplicar por N_{Ed}/N_{pl} é sempre superior ao factor a multiplicar por $M_{z,Ed}/M_{z,pl}$ em ambos os métodos. Apesar da comparação para $n = 0,05$ e $n = 0,1$ ter sido feita por expressões diferentes, para $n = 0,15$ a expressão utilizada foi a 4.23 e a conclusão foi a mesma. Basta o factor de interacção k_{zz} do método 1 ter um valor mais alto para suceder as curvas obtidas nas figuras 4.21 e 4.24.

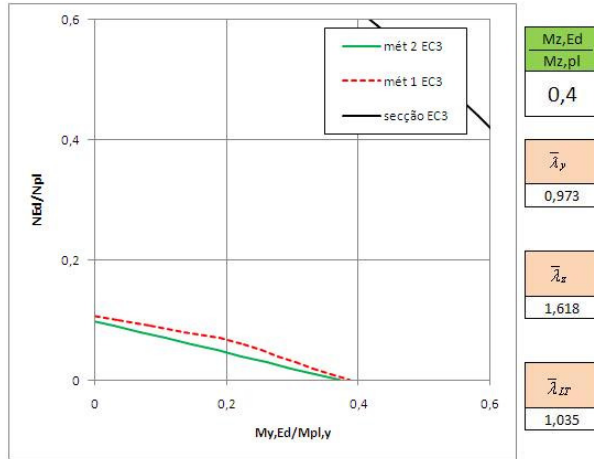


Figura 4. 26 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

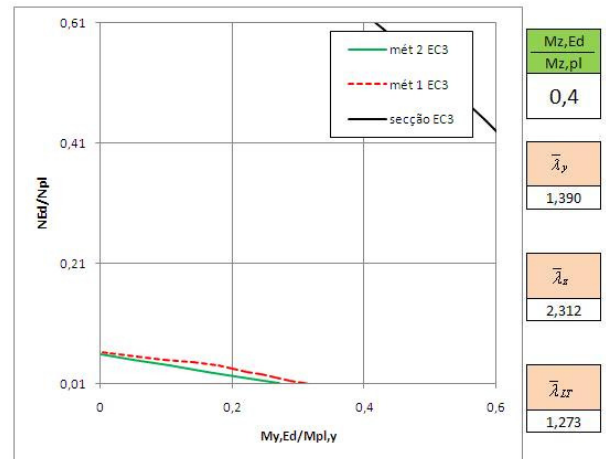


Figura 4. 27 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

As figuras 4.26 e 4.27 apresentam as curvas com o comportamento que seriam de esperar e mais se pode constatar que estas convergem para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$. A expressão utilizada é a 4.23 em ambos os métodos mas com os factores de interacção muito idênticos.

4.3.4. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$

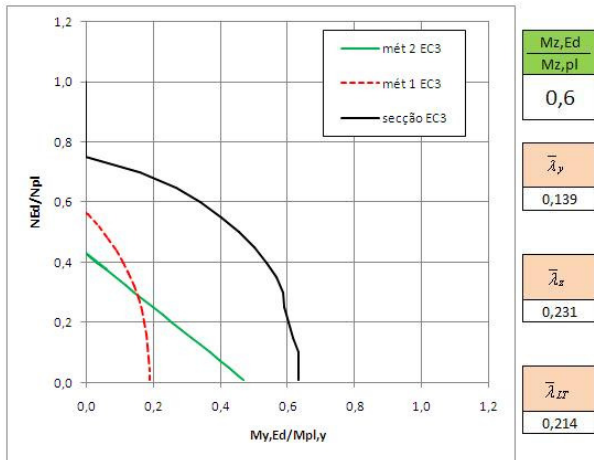


Figura 4. 28 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

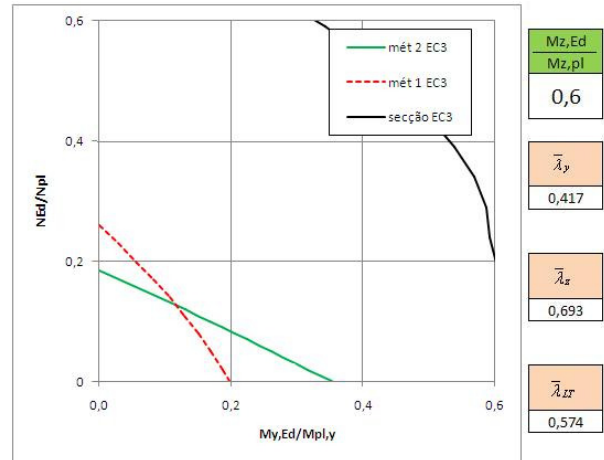


Figura 4. 29 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

As figuras 4.28 e 4.29 apresentam os dois métodos com as suas respectivas curvas diferentes um do outro. As curvas de ambos são definidos pela expressão 4.23 (z-z), porém o método 2 apresenta praticamente uma recta, enquanto o método 1 apresenta uma curva com uma inclinação bem diferente. Mais uma vez existe uma divergência e só para constatar pelos factores de interacção para $N_{Ed}/N_{pl} = 0,06$ (método 1: $k_{zz} = 1,361$; $k_{zy} = 0,557$ e método 2: $k_{zz} = 1,065$; $k_{zy} = 0,992$) para o gráfico da figura 4.29.

Para $n = 0,06$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,670 - 2,287 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 2,272 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,938 - 1,284 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,998 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2).

Nas figuras 4.30 e 4.31 pode-se observar na mudança de comportamento da curva do método 1. As curvas continuam com as suas diferenças, mas ambas são regulares, devido ao facto dos factores de interacção da expressão 3.23 (z-z) terem valores mais aproximados do que acontecia para outros comprimentos de encurvadura como no ponto $N_{Ed}/N_{pl} = 0,09$ (método 1: $k_{zz} = 1,195$; $k_{zy} = 0,612$ e método 2: $k_{zz} = 1,057$; $k_{zy} = 0,974$) da figura 4.30 por exemplo.

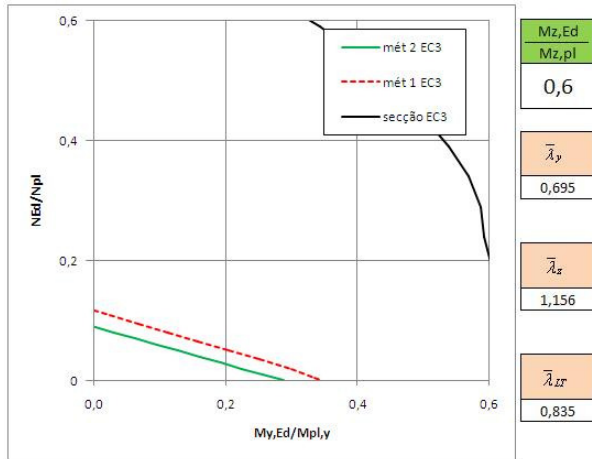


Figura 4. 30 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

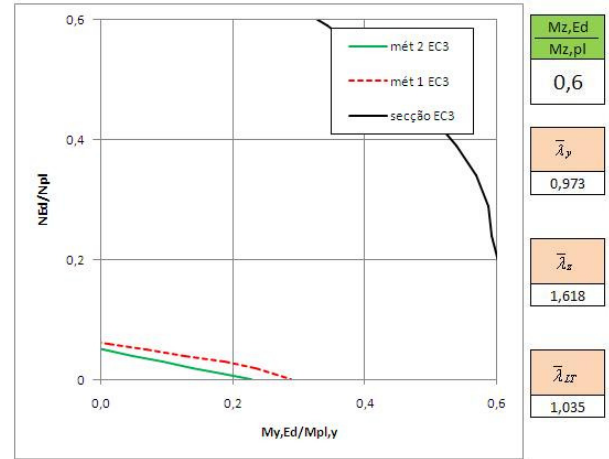


Figura 4. 31 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

4.3.5. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,8$

As figuras 4.32 e 4.33 apresentam os dois métodos com as curvas correspondentes diferentes um do outro, mas as curvas dos dois são definidas pela expressão 4.23 (z-z). No entanto ao mudar o comprimento de encurvadura para 5 m (figura 4.34), as curvas entre si não diferem tanto. Claro que esta aproximação deve-se aos valores dos factores de interacção não diferirem muito entre si.

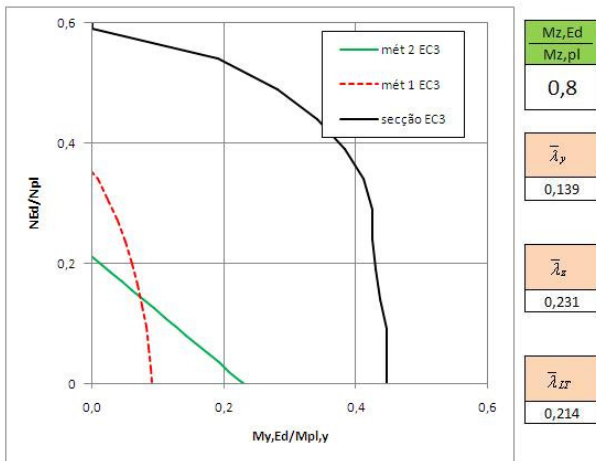


Figura 4. 32 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$

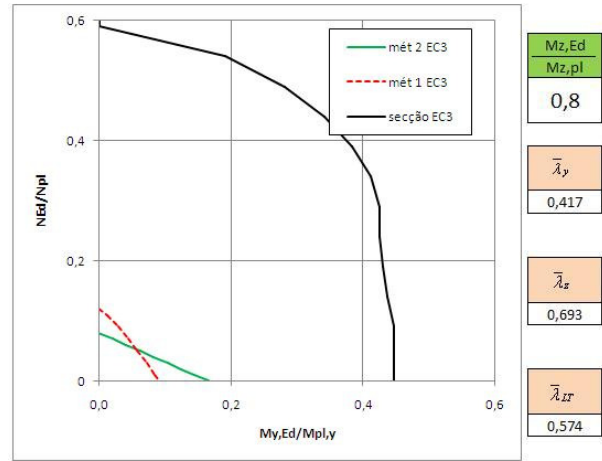


Figura 4. 33 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$

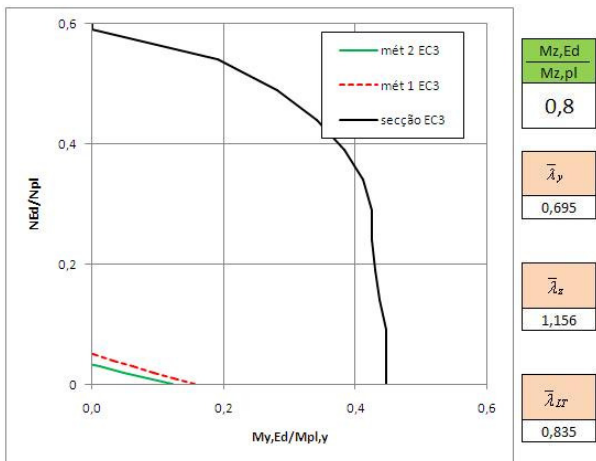
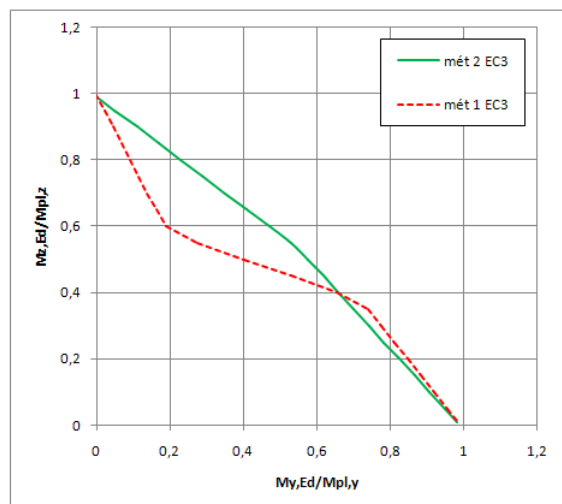
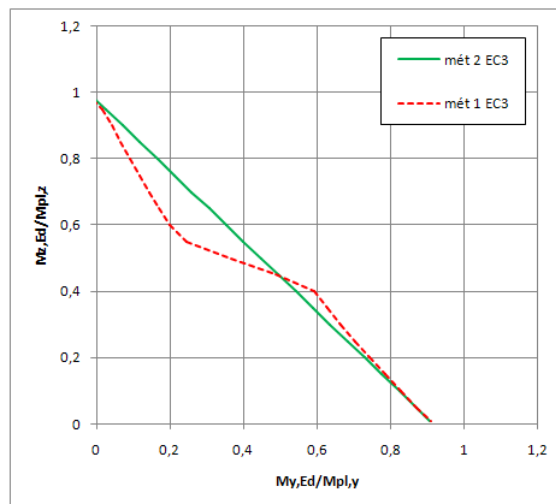


Figura 4. 34 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$

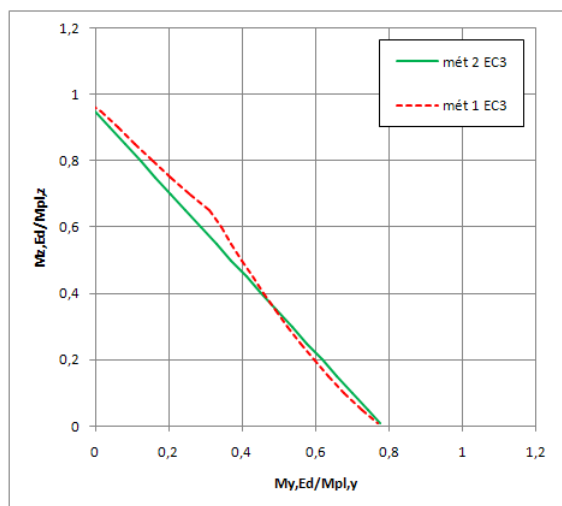
Se verificarmos num gráfico com eixos diferentes (M_z e M_y) e observarmos a evolução das curvas alterando apenas o comprimento de encurvadura repara-se que a diferença entre os dois métodos diminui com o comprimento de encurvadura a aumentar (figura 4.35).



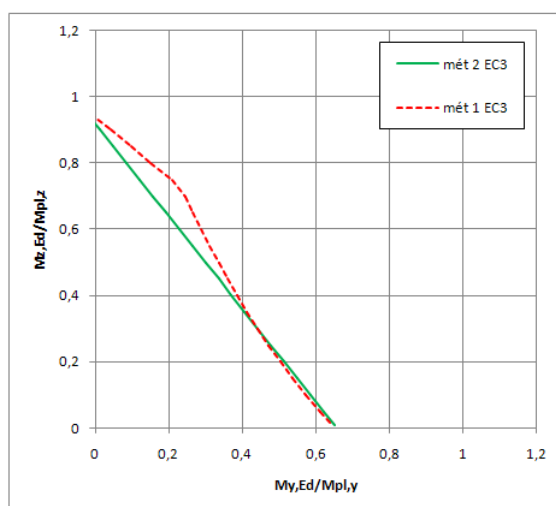
L = 1 m



L = 3 m



L = 5 m



L = 7 m

Figura 4.35 - Viga-coluna: $N_{Ed}/N_{pl} = 0,0$

Analisando a figura 4.35, que mostra a evolução das curvas sujeitas a vários comprimentos de encurvadura, dá-se conta, para comprimento de encurvadura igual a 1 metro, as curvas a partir de determinada altura existe um afastamento. Este deve-se à diferença de valores dos factores de interacção 4.23 (z-z) verificados ao longo destes casos de estudo criando as curvas irregulares. No entanto foi sempre possível verificar uma aproximação das curvas com o aumento dos comprimentos de encurvadura e isso aplica-se à aproximação dos factores de interacção, sendo estes sempre referentes à expressão 4.23 (z-z). Para comprimento de encurvadura igual a 1 metro, a curva do método 1 é definida inicialmente pela expressão 4.23 e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,74$ é definida pela expressão 4.22.

4.4. Utilização das curvas ao fogo no aço carbono

4.4.1. Elemento comprimido a altas temperaturas

Tem em consideração um elemento, na figura 4.36 sujeita ao esforço axial de compressão e ao fogo e a sua resistência à encurvadura de acordo com o EC3-1-2:



Figura 4. 36 - Elemento sujeito à compressão ao fogo

$$\frac{N_{fi,Ed}}{N_{fi,Rd}} \leq 1,0 \quad (4.46)$$

Para as classes 1,2 e 3:

$$N_{b,fi,Rd} = \frac{\chi_{fi} \times A \times f_y \times k_{y\theta}}{\gamma_{M1}} \quad (4.47)$$

Para a classe 4:

$$N_{b,fi,Rd} = \frac{\chi_{fi} \times A_{eff} \times f_y \times k_{y\theta}}{\gamma_{M1}} \quad (4.48)$$

Nota: $\gamma_{M1} = 1,0$ sendo um factor parcial utilizado para elementos estruturais sujeitos à instabilidade.

Factor de redução é:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \lambda_{\theta}^2}} \leq 1,0 \quad (4.49)$$

onde:

$$\phi_{fi} = 0,5 \times \left[1 + \alpha \times \bar{\lambda}_\theta^2 + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] \quad (4.50)$$

o factor de imperfeição é dado por:

$$\alpha = 0,65 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.51)$$

e:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \quad (4.52)$$

Em que a carga crítica (Euler):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I \times k_{E,\theta}}{L_{cr}^2} \quad (4.53)$$

A esbelteza adimensional é dada por:

$$\bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (4.54)$$

Nota: o perfil utilizado ao longo do trabalho é HEA200 para as devidas relações e o aço é S275.

Os parâmetros utilizados para a determinação da esbelteza adimensional são:

- $k_{y,\theta}$ é o factor de redução da tensão de cedência;
- $k_{E,\theta}$ é o factor de redução do módulo de elasticidade linear.

É possível a sua determinação, porque estes factores encontram-se definidos no EC3-1-2, em função da temperatura a que o aço está sujeita. Neste trabalho, foi escolhida uma temperatura de 500°C para o perfil HEA200.

Temperatura do aço °C	Factor de redução para a relação da força-tensão do aço carbono a temperaturas	
	$k_{y,\theta}$	$k_{z,\theta}$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	1,00	0,90
300	1,00	0,80
400	1,00	0,70
500	0,78	0,60
600	0,47	0,31
700	0,23	0,13
800	0,11	0,09
900	0,06	0,07
1000	0,04	0,05
1100	0,02	0,02
1200	0,00	0,00

Tabela 4. 6 - Factores de redução para uma determinada temperatura

A resistência de um perfil a altas temperaturas é reduzida devido à acção da mesma. Na imagem 4.37 é demonstrado a influência do factor de redução e a sua variação acentua a partir dos 400°C.

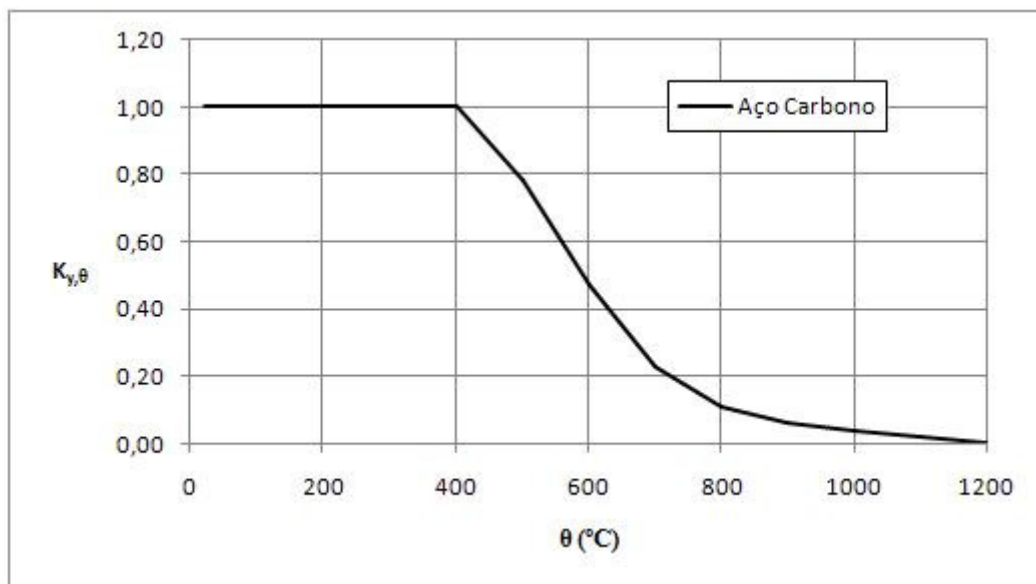


Figura 4. 37- Factor de redução para a relação da força-tensão do aço carbono

4.4.2. Elemento sujeito à flexão com encurvadura lateral a altas temperaturas

Esta viga, figura 4.38, é sujeita à flexão composta e desviada com encurvadura lateral e ao fogo, e a sua resistência à encurvadura lateral de acordo com o EC3 tem de ser:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \times w_{pl,y} \times k_{y,\theta,com} \times f_y \quad (4.55)$$

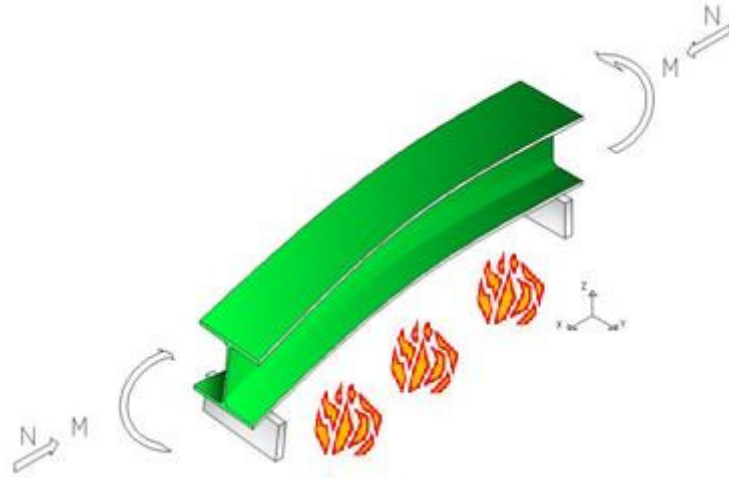


Figura 4. 38 - Viga sujeita à flexão com encurvadura lateral ao fogo

Factor de redução lateral é:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta,com})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2}} \leq 1,0 \quad (4.56)$$

onde:

$$\phi_{fi} = 0,5 \times \left[1 + \alpha \times (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (4.57)$$

o factor de imperfeição é dado pela expressão 4.58 e:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{pl,y} \times f_y}{M_{cr}}} \quad (4.58)$$

Em que o M_{cr} é determinado pela expressão 4.19 e a esbelteza adimensional é dada por:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (4.59)$$

4.4.3. Elemento sujeito à flexão composta com compressão

No EC3-1-2, considera para o aço carbono em situação de incêndio e para elementos de classe 1 ou 2 com flexão composta e desviada com encurvadura lateral a seguinte expressão:

- Classe 1 e 2:

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,pl}} = \left(1 - \frac{1}{\chi_{z,fi}} \times \frac{N_{fi,Ed}}{N_{fi,pl}} - k_z \times \frac{1}{k_{y,\theta}} \times \frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,pl}} \right) \times \frac{\chi_{LT,fi} \times k_{y,\theta}}{k_{LT}} \quad (4.60)$$

A expressão 4.60 tem vários factores que consistem:

- Factores de redução $\chi_{z,fi}$ (4.49), e $\chi_{LT,fi}$ (4.56);

- Factor de interacção $k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \times N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \times k_{y,\theta} \times N_{fi,pl}} \leq 1,0$; (4.61)

com:

$$\mu_{LT} = 0,15 \times \bar{\lambda}_{z,\theta} \times \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (4.62)$$

- Factor de interacção $k_z = 1 - \frac{\mu_z \times N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \times k_{y,\theta} \times N_{fi,pl}} \leq 3,0$; (4.63)

com:

$$\mu_z = (2 \times \beta_{M,z} - 5) \times \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \times \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \text{ e } \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (4.64)$$

O factor de momento equivalente uniforme, $\beta_{M,\psi} = \beta_{M,z} = \beta_{M,LT}$, considera um diagrama de momentos de acordo com a figura 4.9 em torno do eixo forte (y-y):

$$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7 \times \psi \quad (4.65)$$

Visto já ter sido estudado as expressões analíticas, encontram-se actualmente no EC3, aqui o ponto de partida vai ser o método 1 e método 2 do EC3-1-1. Com as respectivas adaptações dos seus coeficientes e verificar até aonde pode haver uma comparação. Sendo assim, as expressões 4.22 e 4.23 passam a ser, para o efeito de encurvadura lateral no eixo y-y a expressão 4.66 e para o efeito de encurvadura lateral no eixo z-z a expressão 4.67 devem-se às forças resistentes diminuir devido a acção do fogo:

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,pl}} = \left(1 - \frac{1}{\chi_{y,fi}} \times \frac{N_{fi,Ed}}{N_{fi,pl}} - k_{yz,fi} \times \frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,pl}} \right) \times \frac{\chi_{LT,fi}}{k_{yy,fi}} \quad (4.66)$$

e:

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,pl}} = \left(1 - \frac{1}{\chi_{z,fi}} \times \frac{N_{fi,Ed}}{N_{fi,pl}} - k_{zz,fi} \times \frac{M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,pl}} \right) \times \frac{\chi_{LT,fi}}{k_{zy,fi}} \quad (4.67)$$

O factor de redução à encurvadura lateral em situação de incêndio vem da expressão 4.56, enquanto os outros factores de redução vêm da expressão 4.49. Em relação aos factores de interacção, dependem do método escolhido como se pode verificar nas expressões que se seguem.

Com estes novos parâmetros, os valores das cargas críticas vão sofrer alterações, pelas seguintes expressões:

$$N_{fi,cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y \times k_{E,\theta}}{I_y^2} \quad (4.68)$$

$$N_{fi,cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z \times k_{E,\theta}}{I_z^2} \quad (4.69)$$

Vai haver uma alteração, embora não tenha sido referido, para ambos os métodos, a determinação de certos parâmetros, tais como:

- Factor de redução (4.49);
- Factor de redução lateral (4.56);
- Esbelteza adimensional (4.59).

São determinados pelo EC3-1-2, para que fosse possível haver condições iguais na comparação das formulações utilizadas pelo EC3 na parte 1-1 e na parte 1-2.

4.4.3.1. Método 1

As expressões utilizadas para a encurvadura lateral são as expressões 4.66 e 4.67 que provêm das expressões 4.22 e 4.23, em que os factores de interacção vão ser diferentes. Porque é preciso ter em conta a acção do fogo, que altera no aço as suas propriedades mecânicas com o aumento da temperatura, como demonstra a figura 4.37 através do factor de redução e também do módulo de elasticidade linear (tabela 4.6).

4.4.2.2. Método 2

As expressões utilizadas para a encurvadura lateral também são as expressões 4.66 e 4.67 provenientes das expressões 4.22 e 4.23, em que os factores de interacção vão ser diferentes. Mais uma

vez deve-se às temperaturas altas e com isto a sua alteração das propriedades mecânicas, como demonstra a figura 4.37 através do factor de redução e também do módulo de elasticidade linear (tabela 4.6).

4.5. Comparação das formulações em aço carbono ao fogo

Foi analisada uma viga-coluna em aço carbono, sujeita a uma carga distribuída ($\psi_y = \psi_z = 1$) em toda a sua secção. As seguintes figuras apresentam uma comparação dos métodos 1 e 2 adaptados à parte do EC3-1-2, sujeita a uma temperatura de 500°C.

4.5.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta e também a curva analítica do EC3-1-2 (CEN, 2005).

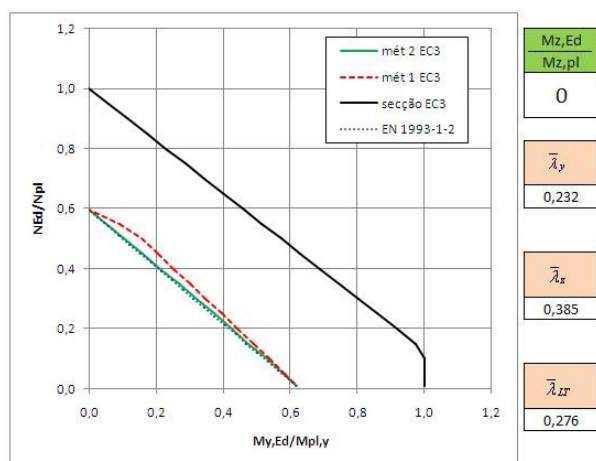


Figura 4. 39 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

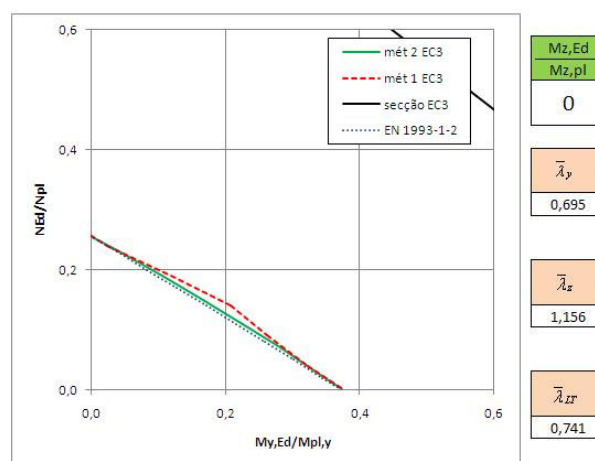


Figura 4. 40 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

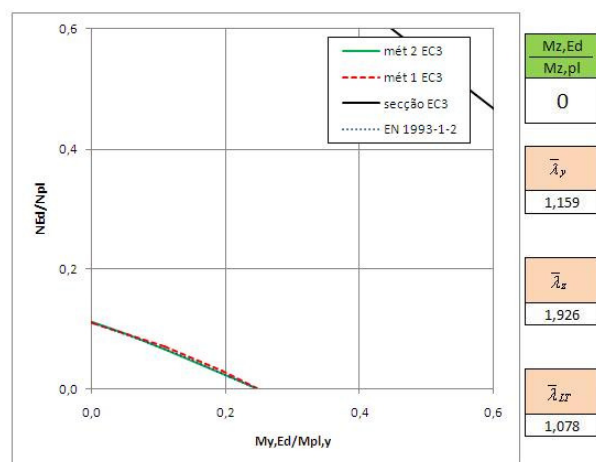


Figura 4. 41 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

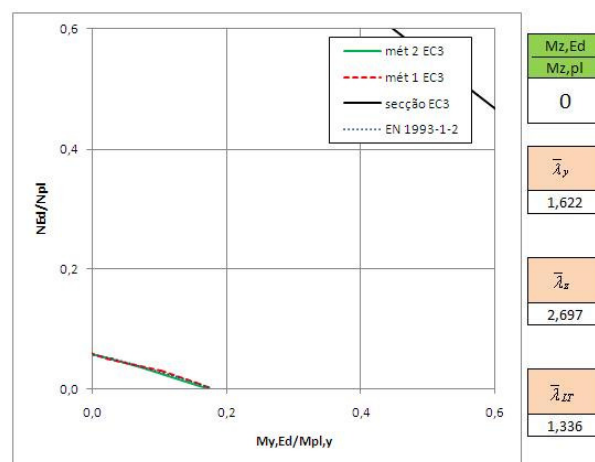


Figura 4. 42 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

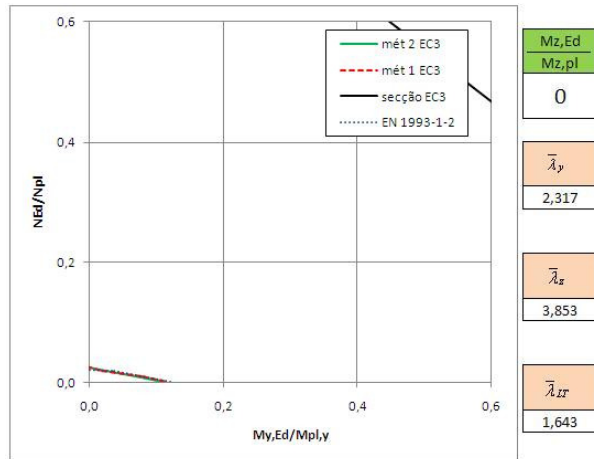


Figura 4. 43 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

As figuras 4.38 a 4.42 demonstram os métodos 1 e 2 sujeitos a uma flexão composta ($N+My$) e a uma temperatura de 500°C bem como a curva analítica do EC3-1-2. As curvas tiveram um comportamento regular, quer seja em comparação com os métodos 1 e 2, quer seja com a curva analítica pertencente ao Eurocódigo. Apesar das diferenças existentes, constata-se que para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ as curvas são todas convergentes. A curva EC3-1-2 apresenta factores diferentes dos métodos 1 e 2, apesar da convergência para qualquer comprimento de encurvadura. A maior diferença verificada entre as curvas é referente ao gráfico da figura 4.38, isto porque no método 2 a curva é definida maioritariamente pela expressão 4.67 (z-z) desde $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ a $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,48$ enquanto no método 1 acontece o oposto. A curva do método 1 utiliza a expressão 4.67 (z-z) desde $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,16$ a $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,62$ e antes é definido pela expressão 4.66 (y-y) acabando por ser possível verificar a transição das expressões devido aos diferentes declives que apresentam.

4.5.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta e desviada, sendo possível verificar uma maior diferença entre eles.

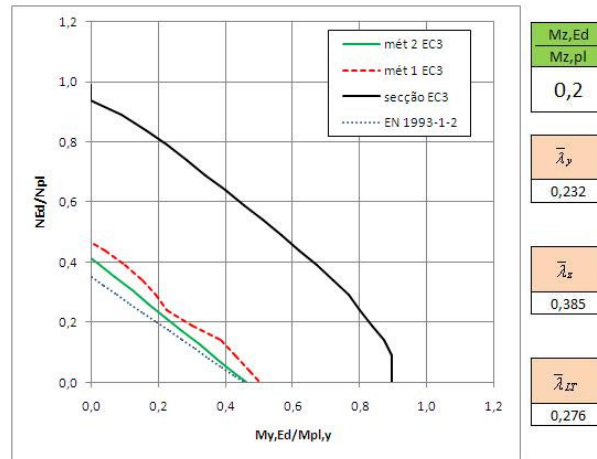


Figura 4. 44 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

A primeira diferença que se pode constatar na figura 4.43 são os métodos 1 e 2 deixaram de convergir para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ por se tratar de uma flexão composta e desviada, apesar da convergência do método 2 com a curva analítica do EC3-1-2. Observando a curva do método 1, repara-se que tem uma transição da expressão 4.67 (z-z) para a expressão 4.66 (y-y) ($M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,23$) enquanto no método 2 a curva é toda definida pela expressão 4.67 (z-z). Se repararmos, as curvas dos métodos 1 e 2 têm os limites da resistência à encurvadura menos conservadores que a curva actual em vigor no EC3-1-2.

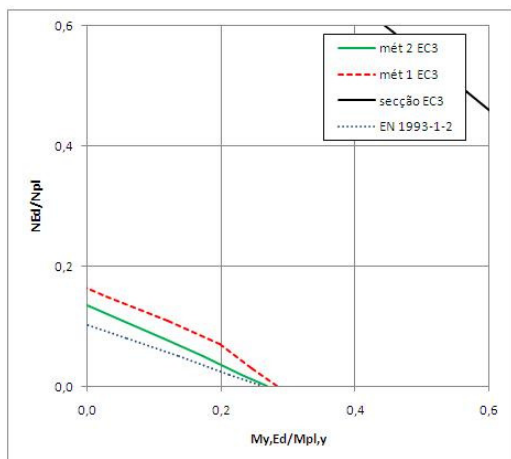


Figura 4. 45 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

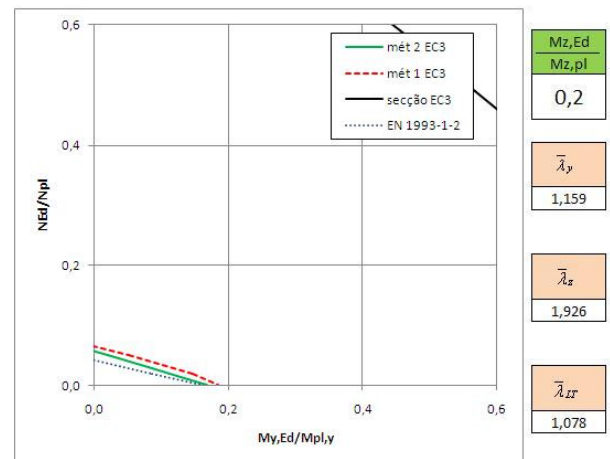


Figura 4. 46 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

As figuras 4.44 e 4.45 apresentam gráficos com os mesmos parâmetros que a figura 4.43, excepto no comprimento de encurvadura. Verifica-se um comportamento diferente no método 1, ou seja, sem haver grande variação ao longo da curva mas uma vez mais a curva EC3-1-2 demonstrou um maior conservadorismo em relação às curvas dos métodos 1 e 2.

4.5.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$

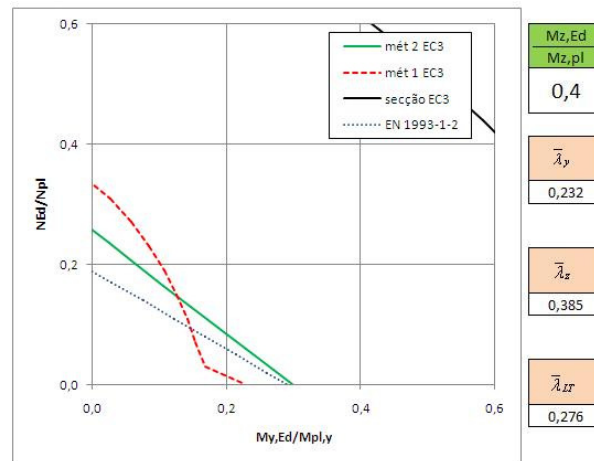


Figura 4. 47 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C

A figura 4.46 apresenta uma curva bastante irregular pelo método 1, visto serem duas curvas bastante diferentes pelos dois métodos. A curva do método 1 é definida em todo gráfico pela expressão 4.67 (z-z) o mesmo sucedendo à curva do método 2. A questão é que o método 2 apresenta praticamente uma recta o mesmo acontecendo à curva do EC3-1-2. A figura 4.47 apresenta os métodos 1 e 2 num gráfico com eixos diferentes (M_z e M_y).

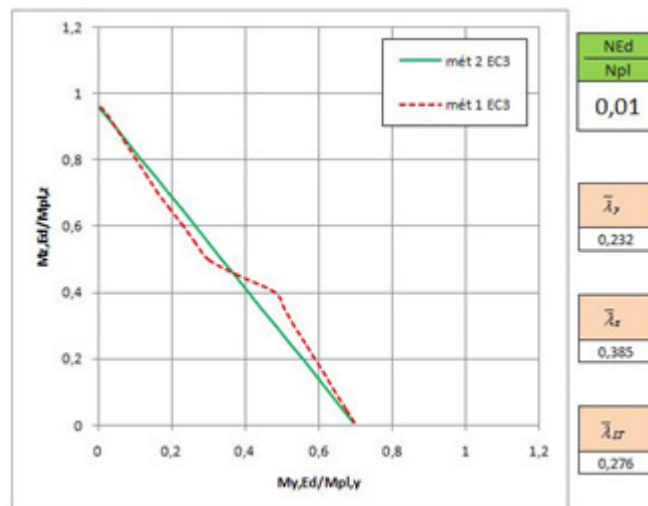


Figura 4. 48 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $N_{Ed}/N_{pl} = 0,0$; 500°C

Pela análise do gráfico da figura 4.47 torna-se evidente que as curvas têm um comportamento regular, excepto para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,38$ por parte do método1, diferindo bastante e não seria algo a esperar. Escolhendo o ponto em causa repara-se na diferença de valores que os factores de interacção apresentam para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,38$ (método 1: $k_{zz} = 1,532$; $k_{zy} = 0,545$ e método 2: $k_{zz} = 1,018$; $k_{zy} =$

0,998). Esta variação está nesta diferença entre os métodos, mas a transição da expressão 4.67 para a expressão 4.66 cria a irregularidade verificada na curva do método 1.

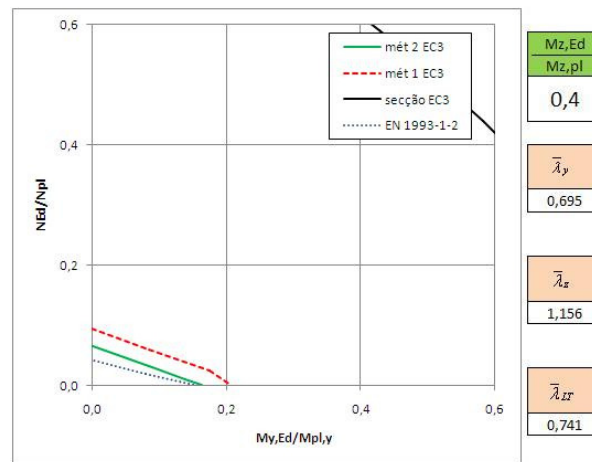


Figura 4. 49 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C

A figura 4.48 apresenta um gráfico com os mesmos parâmetros que a figura 4.46, excepto no comprimento de encurvadura. Verifica-se um comportamento diferente no método 1, ou seja sem haver grande variação ao longo da curva, uma vez mais a curva EC3-1-2 demonstrou um maior conservadorismo em relação às curvas dos métodos 1 e 2.

Para o fogo, os casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$ não foram observados aqui por apresentarem valores muito pequenos e com poucos pontos.

4.6. Conclusões

Na verificação da resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral com torção foi utilizado o método das secções laminadas e soldadas equivalentes, porque é mais económico por possibilitar a escolha do tipo de carregamento que o elemento está sujeito e neste caso foi $\psi_y = \psi_z = 1,0$.

Foram utilizadas expressões do EC3-1-1 (método 1 e método 2) para vigas-coluna à temperatura ambiente e verificar o comportamento das curvas dos dois métodos. Ambos os métodos, quando sujeitos à flexão composta tiveram um comportamento esperado, desde a convergência para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$.

Quando sujeitos a mais do que um momento, ou seja, flexão composta e desviada constatou-se que a curva do método 1 apresentava um formato irregular em alguns casos. Numa observação simples existe um afastamento do método 1 do método 2 em vários pontos (4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 e 4.3.5). Em muitos destes casos a divergência dos métodos foi maior para o comprimento de encurvadura igual a 1

metro, contudo a manter os restantes parâmetros e aumentar o comprimento de encurvadura vê-se uma aproximação dos métodos nos pontos referidos anteriormente e acabando muitas vezes por convergirem. Com mais detalhe foi possível verificar na divergência das curvas valores dos factores de interacção a diferirem bastante e estes são os responsáveis pelos declives das rectas e mais uma vez com o aumento de comprimento de encurvadura uma aproximação destes valores.

As divergências das curvas foram na limitação da resistência da encurvadura pelo eixo de z-z, em que o factor de interacção k_{zz} diferia bastante nos métodos 1 e 2 (4.3.2 e 4.3.3). No caso do ponto 3.3.3 demonstrou-se que, se as curvas fossem limitadas pelo eixo y-y apresentariam uma forma regular mas com valores mais altos.

Na verificação da resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral com torção e ao fogo, utilizou-se o procedimento do EC3-1-1 adaptado à parte 1-2 em que se fez as respectivas alterações aos factores de redução, de imperfeição e factores para a relação força-tensão. Ambos os métodos, quando sujeitos à flexão composta tiveram um comportamento esperado, desde a convergência para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ bem como a curva analítica do EC3-1-2 sendo possível o procedimento aplicado na parte 1-1 ser apropriado ao fogo. Quando os métodos são submetidos à flexão composta e desviada verifica-se uma vez mais um formato irregular da curva do método 1 em relação ao método 2, (4.5.2 e 4.5.3) devido à transição da expressão utilizado de um eixo para o outro enquanto no método 2 a transição torna-se invisível. Isto acontece devido à diferença significativa que existe nos valores de interacção definidos pelo método 1 para y-y e para z-z. Mais importante do que isto, considerando a curva analítica da parte 1-2, verifica-se que os métodos 1 e 2 permitem limites de resistência mais altos em relação à própria curva do EC3-1-2 em vigor na limitação da segurança dos elementos.

Capítulo 5

Verificação do elemento em aço inoxidável

Capítulo 5 - Verificação do elemento em aço inoxidável

5.1. Considerações gerais.....	79
5.2. Utilização das curvas ao aço inoxidável à temperatura ambiente.....	79
5.2.1. Elementos à compressão	79
5.2.2. Elementos sujeitos à flexão composta com compressão.....	81
5.2.2.1. Método 1	83
5.2.2.2. Método 2	84
5.3. Comparação das formulações em aço inoxidável à temperatura ambiente	84
5.3.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	84
5.3.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	86
5.3.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	88
5.3.4. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$	91
5.3.5. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,8$	92
5.4. Utilização das curvas ao fogo no aço inox.....	93
5.4.1. Elemento sujeito à flexão com encurvadura lateral a altas temperaturas	93
5.4.1.1. Método 1	96
5.4.1.2. Método 2	96
5.5. Comparação das formulações em aço inoxidável ao fogo	96
5.5.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$	96
5.5.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$	98
5.5.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$	100
5.6. Conclusões	102

5.1. Considerações gerais

Existe um outro tipo de aço, com outras características ao nível da resistência, da estética, mas também se destaca devido à sua capacidade de resistir à corrosão, ou seja, ideal para estruturas (Estrada, 2006) o aço inoxidável. A sua utilização tem vindo a aumentar, apesar de o seu dimensionamento ser o mesmo que o do aço carbono (CEN, 2006). No entanto é necessário verificar que as ligas de aço inoxidável são caracterizadas pelas suas relações tensão-deformação não lineares com uma baixa tensão de proporcionalidade e uma extensa fase de endurecimento. Porém não existe uma tensão de cedência bem definida, sendo usualmente considerado o valor da tensão correspondente a 0,2% de extensão (Vila Real, 2009).

5.2. Utilização das curvas ao aço inoxidável à temperatura ambiente

5.2.1. Elementos à compressão

Tem em conta um elemento, na figura 5.1 sujeita ao esforço axial de compressão e a sua resistência à encurvadura de acordo com o EC3-1-4:

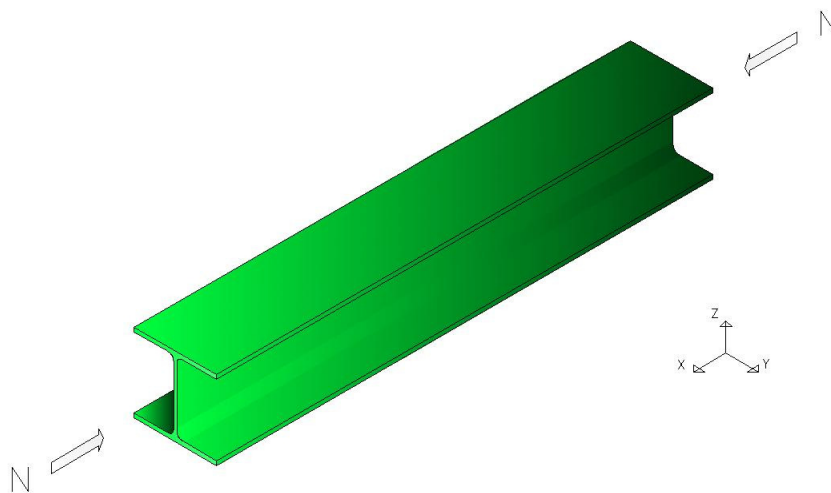


Figura 5. 1- Elemento sujeito à compressão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1,0 \quad (5.1)$$

É considerado um factor de redução para as secções de classe 1, 2 ou 3 na sua análise, expressão 5.2, para a determinação das suas curvas de encurvadura, mas na classe 4, expressão 5.3, é preciso ter em conta área efectiva (A_{eff}) devido à possibilidade de encurvadura local:

Para as classes 1,2 e 3:

$$N_{Rd} = \frac{\chi \times A \times f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.2)$$

Para a classe 4:

$$N_{Rd} = \frac{\chi \times A_{eff} \times f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.3)$$

Nota: $\gamma_{M0} = 1,0$ sendo um factor parcial utilizado para elementos estruturais sujeitos à instabilidade.

Como se trata de um aço inoxidável, vai haver diferenças em relação ao aço carbono na determinação do factor de redução, mas continua a ser o mínimo entre os factores de redução em y-y (eixo forte) e z-z (eixo fraco) (Maquoi e Rondal, 1978).

Factor de redução é:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (5.4)$$

onde:

$$\phi = 0,5 \times \left[1 + \alpha \times (\bar{\lambda}^2 - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (5.5)$$

e:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} \quad (5.6)$$

Na expressão 5.5 existe a primeira alteração significativa, além do factor de imperfeição ser diferente. Neste caso é preciso ter em conta o modo de encurvadura e depois o tipo de perfil, como demonstra a tabela 5.1 e que se encontra no EC3-1-4 (CEN, 2005).

Nota: o perfil utilizado ao longo do trabalho é HEA200 para as devidas relações e o aço é 1,4301.

De acordo com o EC3-1-4, os parâmetros α e $\bar{\lambda}_0$ são fornecidos pela tabela 5.1:

Modo de encurvadura	Tipo de membro	α	$\bar{\lambda}_0$
Flexão	Perfis formados a frio	0,49	0,40
	Perfis ocos (soldados)	0,49	0,40
	Perfis abertos (eixo maior)	0,49	0,20
	Perfis abertos (eixo menor)	0,76	0,20
Torção e flexão-torção	Todos	0,34	0,20

Tabela 5. 1 - Selecção da curva de encurvadura para perfis I laminados (CEN,2005)

Para determinar a carga crítica N_{cr} (Euler), utiliza-se a expressão 4.11.

5.2.2. Elementos sujeitos à flexão composta com compressão

Esta viga, figura 5.2, é sujeita à flexão com encurvadura lateral, e a sua resistência à encurvadura lateral de acordo com o EC3 tem de ser:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0 \quad (5.8)$$

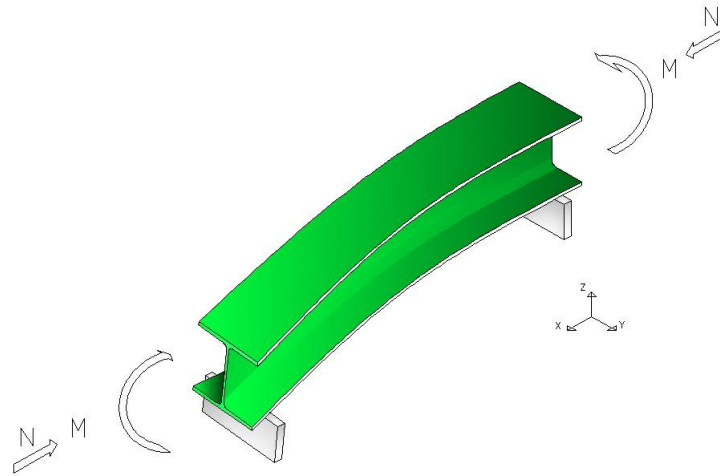


Figura 5. 2 - Viga sujeita à encurvadura com torção

É considerado apenas para secções de classe 1, 2 ou 3 a sua análise para a determinação da sua curva de encurvadura:

$$M_{Rd} = \chi_{LT} \times w_y \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5.9)$$

Neste caso e segundo o EC3, é preciso ter em conta a classe do perfil, visto que:

$$w_y \begin{cases} w_{pl,y} & \text{para secções transversais de classe 1 e 2} \\ w_{el,y} & \text{para secções transversais de classe 3} \\ w_{eff,y} & \text{para secções transversais de classe 4} \end{cases}$$

Para o momento resistente em aço inoxidável, é dado na expressão 5.9 e de acordo com o EC3-1-4, o factor de redução é obtido a partir da expressão:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0 \quad (5.10)$$

em que:

$$\phi_{LT} = \frac{1}{2} [1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (5.11)$$

e:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} \quad (5.12)$$

De acordo com o tipo de perfil utilizado os valores utilizados neste trabalho de acordo com a tabela 5.1 foram os seguintes:

para y-y:

- $\alpha = 0,49$;
- $\bar{\lambda}_0 = 0,20$;

para z-z:

- $\alpha = 0,76$;
- $\bar{\lambda}_0 = 0,20$.

O EC3-1-4 define que o factor de imperfeição α_{LT} :

- 0,34 para secções enformadas a frio e secções tubulares;
- 0,76 para secções abertas soldadas ou secções que não possuam testes (deste trabalho).

O EC3-1-4 dispensa a verificação da encurvadura lateral se acontecer uma destas condições;

- $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$;
- $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$.

Para resolver a expressão 5.12, existe um factor, o momento crítico elástico apesar de não constar no EC3 (CEN, 2005), poderá ser encontrado no capítulo 3 deste trabalho (Lindner, 2003; Lopes, 2009; et al) na expressão 4.19.

O aço inoxidável tem uma expressão já definida para o seu dimensionamento (CEN, 2006), quando sujeito à encurvadura lateral com torção. Os seus factores de interacção diferem dos utilizados até agora para o carbono (expressões 5.14 e 5.15). Logo o EC3-1-4 considera para o aço inoxidável:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} - k_z \times \frac{1}{\beta_{w,z}} \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}} \right) \times \frac{\chi_{LT}}{k_{LT}} \quad (5.13)$$

A expressão 5.13 tem vários factores em que consiste:

- $k_z = 1 + 2 \times (\bar{\lambda}_z - 0,5) \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl(\min)}} ; \quad (5.14)$

mas:

$$1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl(\min)}} \quad (5.15)$$

- $k_{LT} = 1,0 \quad (5.16)$

- $\beta_w = 1,0; \quad (5.17)$

- $N_{b,Rd} = \min \begin{cases} \chi_y \times N_{pl} ; \\ \chi_z \times N_{pl} . \end{cases} \quad (5.18)$

Como tem apenas uma expressão para ambos os eixos o Eurocódigo considera o menor dos factores de redução, para estar do lado da segurança relativamente a ambos os eixos. Também se pode concluir a determinação dos factores de interacção serem muito mais fáceis.

5.2.2.1. Método 1

Este ponto corresponde praticamente ao ponto 4.2.3.1, em que o método 1 vai ter factores de interacção diferentes. Esta alteração deve-se ao tipo de material utilizado, mas também às expressões para calcular o factor de redução (expressão 5.10). Os factores de interacção para perfis das classes 1 e 2, através do método 1 (grupo Franco-Belga) de acordo com as propriedades plásticas da secção

transversal e considerando a flexão composta e desviada com encurvadura lateral (C_{mLT}), são determinados de acordo com as seguintes expressões 4.27 a 4.30. Em relação aos outros coeficientes:

- Coeficiente de momento equivalente em y-y (4.31);
- Coeficiente de momento equivalente em z-z (4.32);
- O factor C_{mLT} (4.33);
- Os factores de momento (4.34 e 4.35);
- Módulos de flexão (4.36 e 4.37);
- O valor de n_{pl} (4.38);
- As cargas críticas (Euler) (4.39 e 4.40).

Os coeficientes μ_y e μ_z são fornecidos no anexo A do EC3-1-1 e os coeficientes c_{yy}, c_{yz}, c_{zy} e c_{zz} , foram obtidos por meios de calibração numérica e também se encontram no mesmo anexo. Estes coeficientes representam a interacção elastico-plástica, entre os momentos de 1ª ordem e o esforço axial.

5.2.2.2. Método 2

Aqui sucede-se o mesmo que o ponto 4.2.3.2, em que o método 2 vai ter factores de interacção diferentes. Esta alteração deve-se ao tipo de material utilizado, mas também às expressões para calcular o factor de redução (expressão 5.10). A metodologia utilizada neste método pelo grupo Austro-Alemão é baseada no conceito de factores globais, logo a determinação dos factores de interacção é um processo mais simples. Logo na determinação dos factores de interacção vão ser utilizadas as expressões 4.41 a 4.45 e em relação aos outros coeficientes são os mesmos que no ponto 5.2.2.1.

5.3. Comparação das formulações em aço inoxidável à temperatura ambiente

Foi analisada uma viga-coluna em aço inox, sujeita a uma carga distribuída ($\psi_y = \psi_z = 1$) em toda a sua secção. As seguintes figuras apresentam uma comparação dos métodos 1 e 2 adaptados ao EC3-1-4 (CEN, 2005) descritos neste capítulo em que existe uma variação do comprimento de encurvadura bem como do momento em z-z. Também apresentam a curva do aço inox do EC3-1-4 e o seu comportamento com as curvas dos métodos 1 e 2.

5.3.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta, sendo possível verificar os seus comportamentos com a curva do aço inoxidável do EC3-1-4.

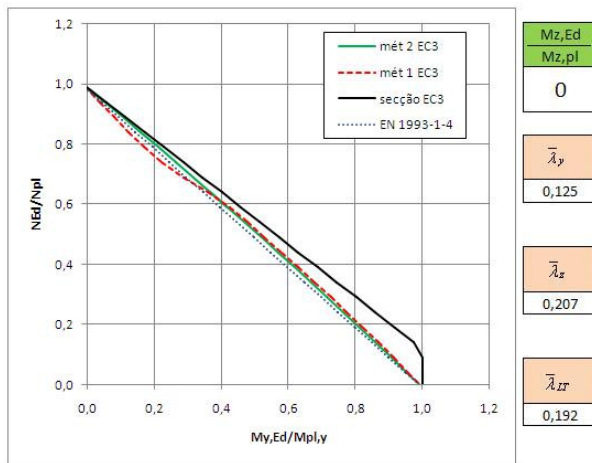


Figura 5.3 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

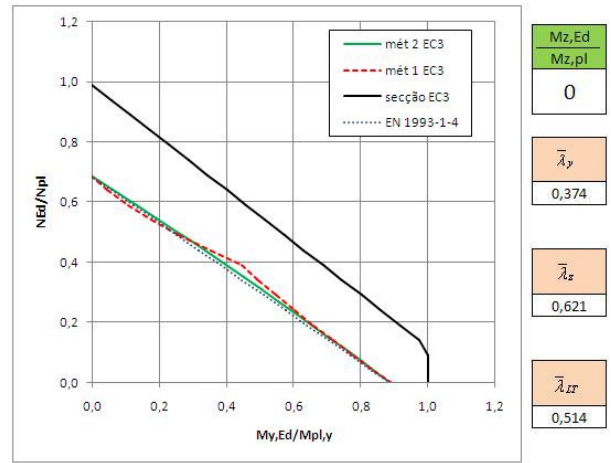


Figura 5.4 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

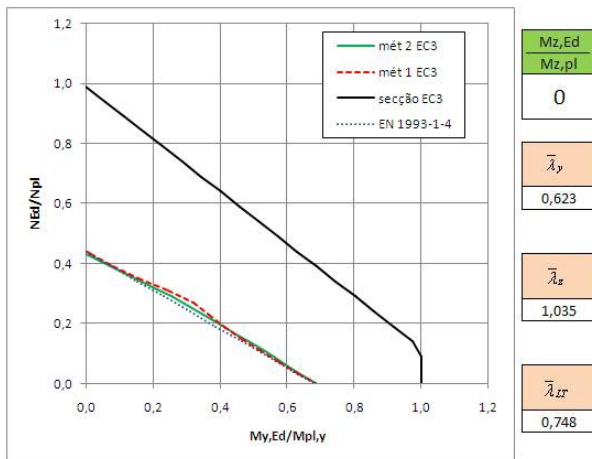


Figura 5.5 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

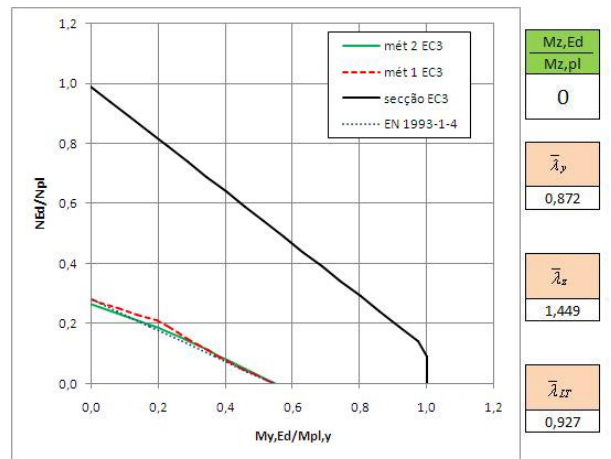


Figura 5.6 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

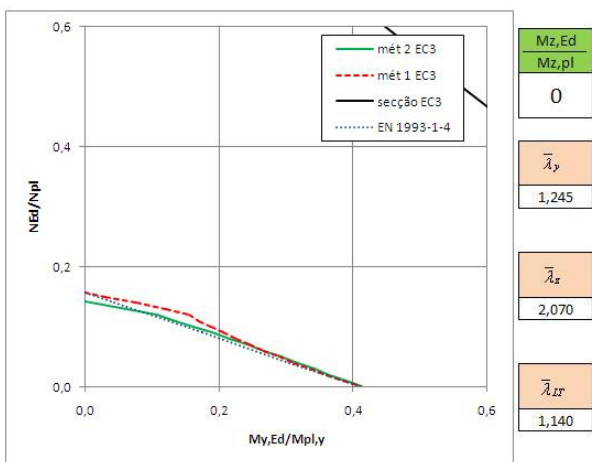


Figura 5.7 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$

Nas figuras 5.3 a 5.7 os métodos 1 e 2 estão sujeitos a uma flexão composta ($N+My$) e as curvas obtidas são muito parecidas. Ou seja, os métodos 1 e 2 convergem para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ por se tratar de uma flexão composta.

Em relação à “curva” da secção, permanece no mesmo sítio porque esta não depende do comprimento de encurvadura mas sim do momento em z-z, como se pode verificar no capítulo 3.

Contudo, ao longo das figuras a curva do aço inox do EC3-1-4 também converge juntamente com as curvas dos métodos 1 e 2 para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$. De acordo com estes gráficos, pode-se ver algumas variações ligeiras das curvas dos métodos 1 e 2 com a do EC3-1-4. As suas variações tendem a diminuir com o comprimento de encurvadura a aumentar, porém a curva analítica do aço inoxidável é ligeiramente mais conservadora desde a figura 5.3 à 5.7.

5.3.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta e desviada, sendo possível verificar uma maior diferença entre eles.

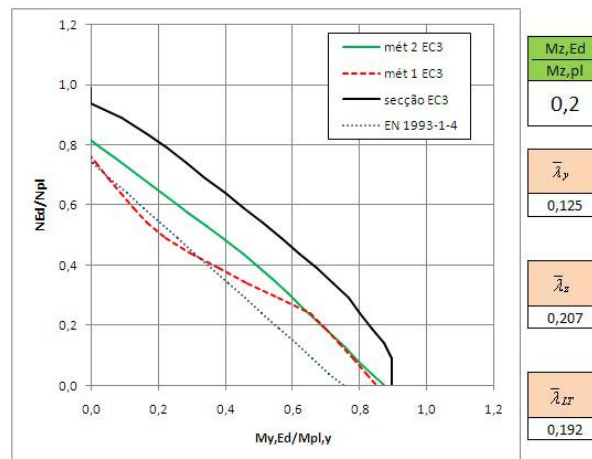


Figura 5. 8 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

Se compararmos a figura 5.8, esta mudou em relação às figuras anteriores e os métodos 1 e 2 deixaram de convergir para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ bem como a curva EC3-1-4. Se antes a convergência das curvas dependia apenas dos factores de redução para a compressão e do momento em y-y, agora ficam sujeitos à flexão composta e desviada. A existência de dois momentos provocou um afastamento do método 1 do método 2 entre os pontos 0 e 0,65 do eixo $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$. Acontece isso, porque entre esses pontos do eixo $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$ é definido pela expressão 4.23 (z-z) e no resto do eixo é definido pela expressão 4.22. Acaba por ter uma curva irregular comparativamente com a do método 2 e a curva EC3-1-4. Apesar de haver também uma mudança de expressão no método 2 ($M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,48$) a curva é mais suave e passa da expressão 4.23 (z-z) para expressão 4.22 (y-y). Isto porque os

factores de interacção em z-z começam a diferir como se pode verificar para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,6$ as curvas são definidas pela expressão 4.23 (método 1: $k_{zz} = 1,391$; $k_{zy} = 0,923$ e método 2: $k_{zz} = 0,888$; $k_{zy} = 0,807$). Mas a figura 5.8 apresenta o comportamento do método 1 de duas formas: quando N_{Ed}/N_{pl} tende para zero tem a convergência da curva do método 2 e quando $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$ tende para zero tem a convergência da curva EC3-1-4. Apesar desta curva de formato irregular, o EC3 (CEN, 2006) continua a apresentar a sua curva analítica mais conservadora em relação aos métodos, principalmente o método 2.

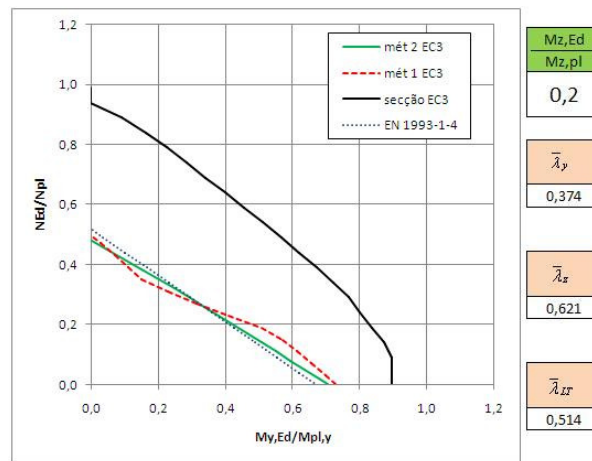


Figura 5. 9 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

Uma vez mais a irregularidade da curva do método 1 na figura 5.9, o único parâmetro alterado foi o comprimento de encurvadura e observa-se uma aproximação das curvas do método 2 com a curva EC3-1-4. O formato irregular da curva do método 1 deve-se à transição da mudança de expressão 4.23 (z-z) para a expressão 4.22 (y-y), é visível e acontece para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0,57$, por isso aquela mudança de inclinação enquanto no método 2 a curva é definida pela expressão 4.23.

As figura 5.10 a 5.12 apresentam gráficos com os mesmos parâmetros que a figura 5.9, excepto no comprimento de encurvadura e verifica-se um comportamento muito idêntico em todas as curvas com as suas devidas diferenças nos factores de interacção.

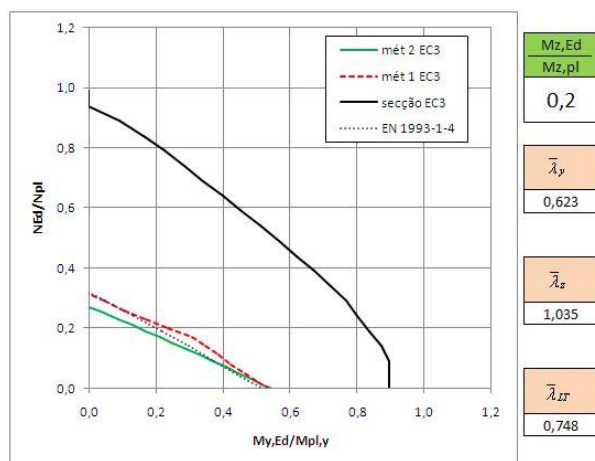


Figura 5. 10 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

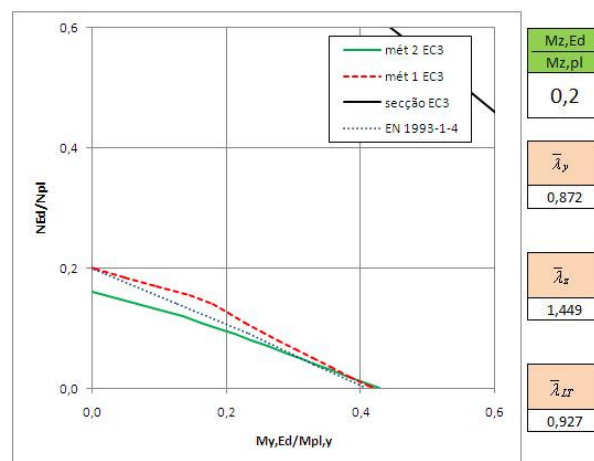


Figura 5. 11 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

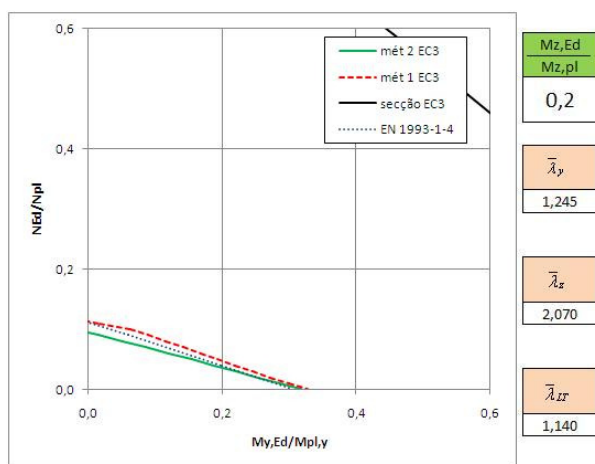


Figura 5. 12 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$

Estas diferenças não são grandes, mas se tivermos em conta a curva analítica do EC3-1-4, esta deixa de ser conservadora em relação ao método 2 enquanto no método 1 é o oposto.

5.3.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$

A figura 5.13 apresenta uma curva irregular pelo método 1, visto serem duas curvas bastante diferentes pelos dois métodos. A curva do método 1 é definida em todo gráfico pela expressão 4.23 ($z-z$) o mesmo sucedendo à curva do método 2. A questão é que o método 2 apresenta praticamente uma recta, sem grandes oscilações. No entanto, existe uma grande diferença de factores de interacção entre a curva analítica do EC3-1-4 e o método 2.

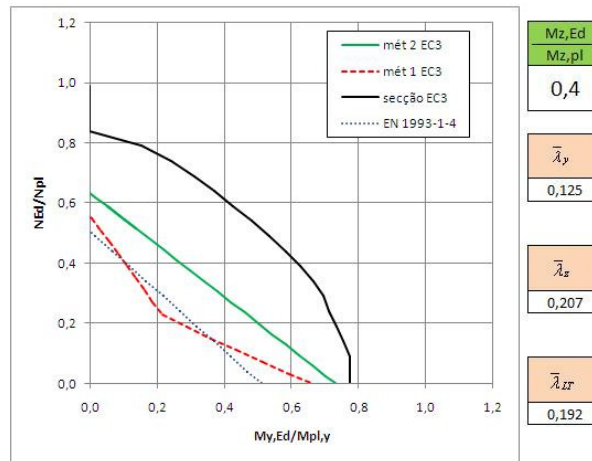


Figura 5. 13 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed} / M_{z,pl} = 0,4$

Se escolhermos alguns pontos do gráfico da figura 5.13, podemos observar o seguinte:

Para $n = 0,01$:

- método 1: $k_{zz} = 1,526$; $k_{zy} = 0,576$;
- método 2: $k_{zz} = 0,998$; $k_{zy} = 0,807$;
- EN 1993-1-4: $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$;

Para $n = 0,2$:

- método 1: $k_{zz} = 1,542$; $k_{zy} = 0,635$;
- método 2: $k_{zz} = 0,963$; $k_{zy} = 0,807$;
- EN 1993-1-4: $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$;

Para $n = 0,4$:

- método 1: $k_{zz} = 1,291$; $k_{zy} = 0,743$;
- método 2: $k_{zz} = 0,925$; $k_{zy} = 0,807$;
- EN 1993-1-4: $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$.

Se repararmos os valores dos métodos diferem bastante e comparando os factores de interacção de cada ponto verifica-se no método 1 o factor k_{zz} bastante superior ao do método 2. Por isso as diferenças verificadas em ambos os métodos, mais importante é a variação de valores que existe ao longo dos pontos considerados. Os factores de interacção definem o declive da curva e se no método 2 e na curva EC3-1-4 a sua variação é pouca ou nula respectivamente, o mesmo já não se pode dizer do método 1 provocando um comportamento irregular na curva.

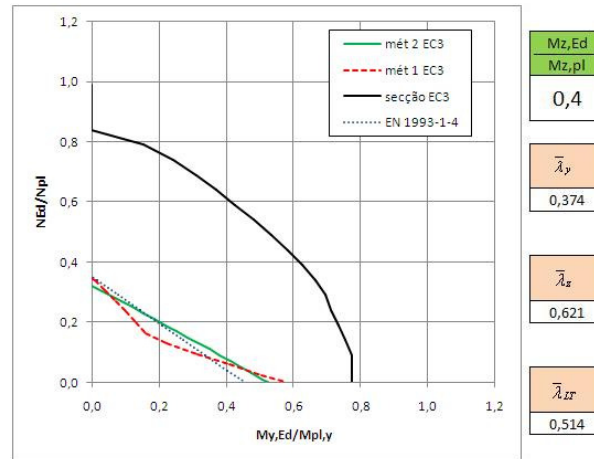


Figura 5. 14 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

A figura 5.14 continua a apresentar uma diferença nas curvas dos dois métodos, principalmente na curva do método 1 e em relação à figura 5.13 existe uma aproximação das curvas do método 2 com a do EC3-1-4. Esta verificação também já tinha sido feita na figura 5.9, na comparação das curvas o método 2 com a do EC3-1-4 para um comprimento de encurvadura de 1 m a curva actual do EC3 tende a ser mais conservadora. Com o aumentar do comprimento de encurvadura, vai haver uma aproximação entre estas duas curvas e também a do método 1 conforme as figuras seguintes.

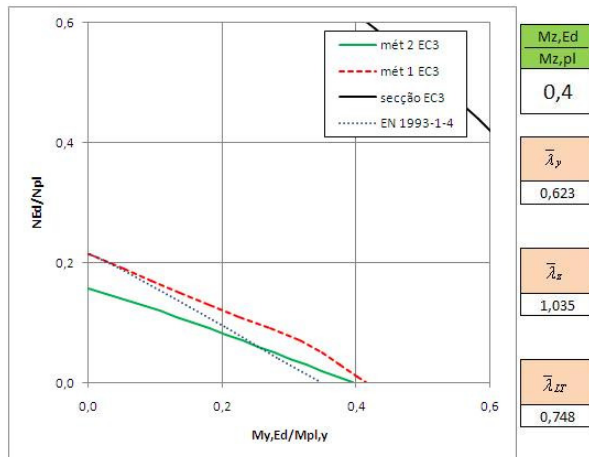


Figura 5. 15 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

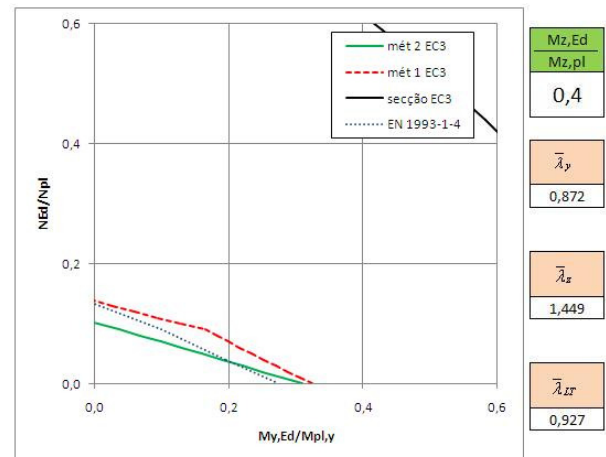


Figura 5. 16 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$

Se escolhermos alguns pontos do gráfico da figura 5.15 em que as curvas são definidas pela expressão 4.23 (z-z), podemos observar o seguinte:

Para $n = 0,1$:

- método 1: $k_{zz} = 1,362$; $k_{zy} = 0,599$;

- método 2: $k_{zz} = 1,311$; $k_{zy} = 0,970$;
- EN 1993-1-4: $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$;

Para $n = 0,15$:

- método 1: $k_{zz} = 1,300$; $k_{zy} = 0,640$;
- método 2: $k_{zz} = 1,467$; $k_{zy} = 0,956$;
- EN 1993-1-4: $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$.

Se repararmos os valores dos factores de interacção, apesar das suas diferenças, são valores mais próximos e o método 1 deixou de uma curva com o comportamento irregular.

5.3.4. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,6$

A figura 5.17 apresenta os dois métodos com as suas respectivas curvas diferentes bem como a curva analítica EC3-1-4. Em relação aos métodos as curvas de ambos são definidos pela expressão 4.23 (z-z). Mais uma vez existe uma divergência e só para constatar pelos factores de interacção para $N_{Ed}/N_{pl} = 0,2$ (método 1: $k_{zz} = 1,231$; $k_{zy} = 0,619$ e método 2: $k_{zz} = 0,963$; $k_{zy} = 0,807$). A curva do EC3-1-4 apresenta um comportamento mais conservador, para o mesmo ponto, $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$. Claro que os factores da expressão 4.13 têm as suas limitações em termos de valor mínimo e máximo e as curvas têm um comportamento mais linear.

Para $n = 0,2$:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,616 - 1,632 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,989 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,239 - 1,252 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,193 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 1,000 - 1,010 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 1,200 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (EC3-1-4).

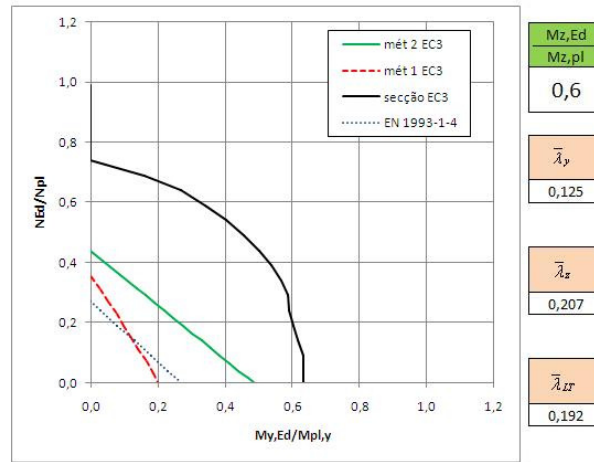


Figura 5. 17 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

Nas figuras 5.18 e 5.19 pode-se observar na mudança de comportamento da curva do método 1. As curvas continuam com as suas diferenças, mas ambas são regulares, devido ao facto dos factores de interacção da expressão 4.23 (z-z) terem valores mais aproximados do que acontecia para outros comprimentos de encurvadura como no ponto $N_{Ed}/N_{pl} = 0,09$ (método 1: $k_{zz} = 1,177$; $k_{zy} = 0,587$ e método 2: $k_{zz} = 1,242$; $k_{zy} = 0,977$) da figura 5.18 por exemplo. Em relação à curva EC3-1-4 continua apresentar uma inclinação diferente de ambos os métodos aplicados pelas limitações impostas e continua apresentar os mesmos factores que o da figura 5.17.

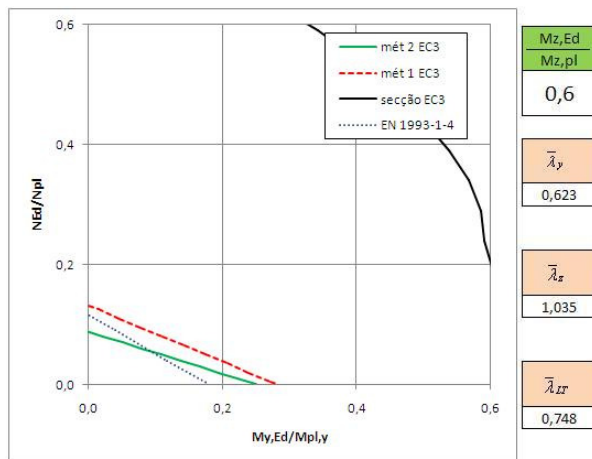


Figura 5. 18 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

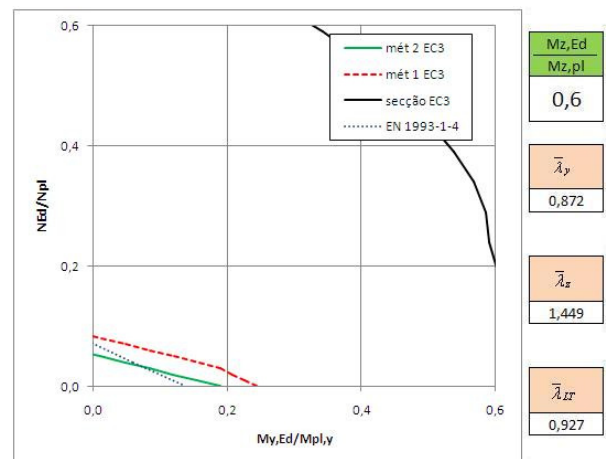


Figura 5. 19 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$

4.3.5. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,8$

A figura 5.20 apresenta os dois métodos com as suas curvas correspondentes diferentes um do outro. As curvas dos dois são definidas pela expressão 4.23 (z-z), enquanto a curva EC3-1-4 demonstra uma maior conservação.

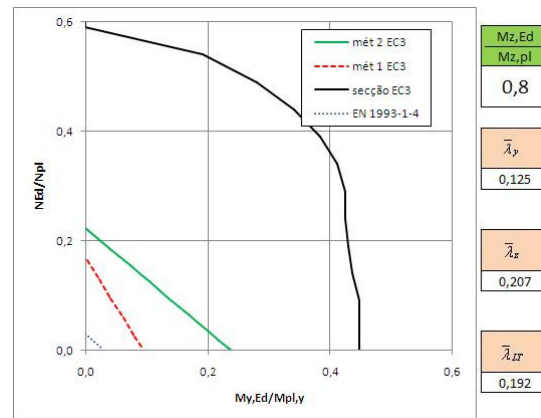


Figura 5. 20 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,8$

A figura 5.20 apresenta os dois métodos com as suas respectivas curvas diferentes bem como a curva analítica EC3-1-4. Em relação aos métodos as curvas de ambos são definidos pela expressão 4.23 (z-z). Mais uma vez existe uma divergência e só para constatar pelos factores de interacção para $N_{Ed}/N_{pl} = 0,1$ (método 1: $k_{zz} = 1,175$; $k_{zy} = 0,531$ e método 2: $k_{zz} = 0,998$; $k_{zy} = 0,807$). A curva do EC3-1-4 apresenta um comportamento mais conservador, para o mesmo ponto, $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$. Claro que os factores da expressão 5.13 têm as suas limitações em termos de valor mínimo e máximo e as curvas têm um comportamento mais linear.

5.4. Utilização das curvas ao fogo no aço inox

5.4.1. Elemento sujeito à flexão com encurvadura lateral a altas temperaturas

Esta viga, figura 5.21, é sujeita à flexão composta e desviada com encurvadura lateral e ao fogo, e a sua resistência à encurvadura lateral de acordo com o EC3 tem de ser de acordo com a expressão 4.55.

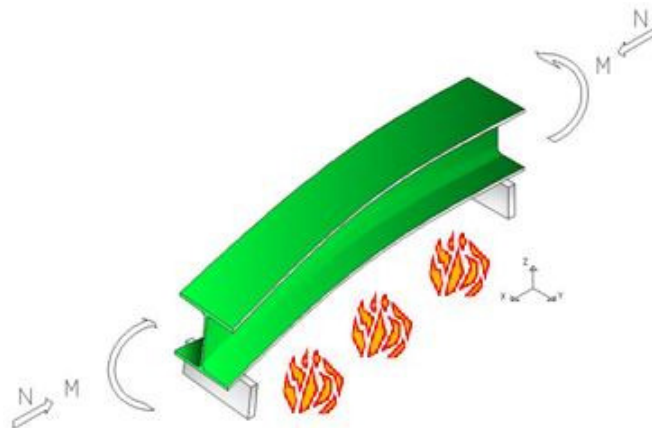


Figura 5. 21 - Viga sujeita à flexão com encurvadura lateral ao fogo

Na determinação da sua resistência são considerados parâmetros já definidos anteriormente, tais como:

- Factor de redução lateral (4.56);
- Factor de imperfeição (4.58);
- Momento crítico (4.19);
- Esbelteza adimensional (4.59).

Para altas temperaturas, o EC3-1-4, refere que deve ser utilizada a mesma formulação prescrita para elementos de aço carbono de acordo com a EC3-1-2.

A tabela 5.2 apresenta os factores de redução para a relação tensão-extensão do aço 1,4301 sujeito a temperaturas de incêndio e pode-se ver a variação desses mesmos factores.

Classe do aço inox -1,4301					
Temperatura do aço	Factor de redução para a relação da força-tensão do aço inox a temperaturas				
°C	$k_{g,\theta}$	$k_{0,2p,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{2\%,\theta}$	$k_{p,\theta}$
20	1,00	1,00	1,00	0,26	1,38
100	0,96	0,82	0,87	0,24	1,14
200	0,92	0,68	0,77	0,19	0,91
300	0,88	0,64	0,73	0,19	0,86
400	0,84	0,60	0,72	0,19	0,82
500	0,80	0,54	0,67	0,19	0,75
600	0,76	0,49	0,58	0,22	0,70
700	0,71	0,40	0,43	0,26	0,57
800	0,63	0,27	0,27	0,35	0,41
900	0,45	0,14	0,15	0,38	0,23
1000	0,20	0,06	0,07	0,40	0,11
1100	0,10	0,03	0,03	0,40	0,05
1200	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00

Tabela 5. 2 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço inoxidável 1,4301 a altas temperaturas

Os valores do factor de redução do aço inox podem ser superiores a 1, por causa do endurecimento existente no aço inox. Enquanto no aço carbono a tensão limite é igual à tensão de 2% ($f_{2\%,\theta}$) e neste caso para S275 com o valor de 275 MPa, para o aço inox 1,4301 a tensão limite é de 0,2% $f_{0,2p,\theta}$ dando o valor de 210 MPa. Um valor inferior se considerasse o mesmo raciocínio do aço carbono para o aço inox que seria de 291 MPa, mas é considerado a deformação de 0,2 % para situações de incêndio e estar do lado da segurança.

A resistência de um perfil a altas temperaturas é reduzida devido à acção da mesma e na imagem 5.22 é demonstrado a influência do factor de redução e a sua variação acentua a partir dos 600°C, mas antes tem um ligeiro decréscimo.

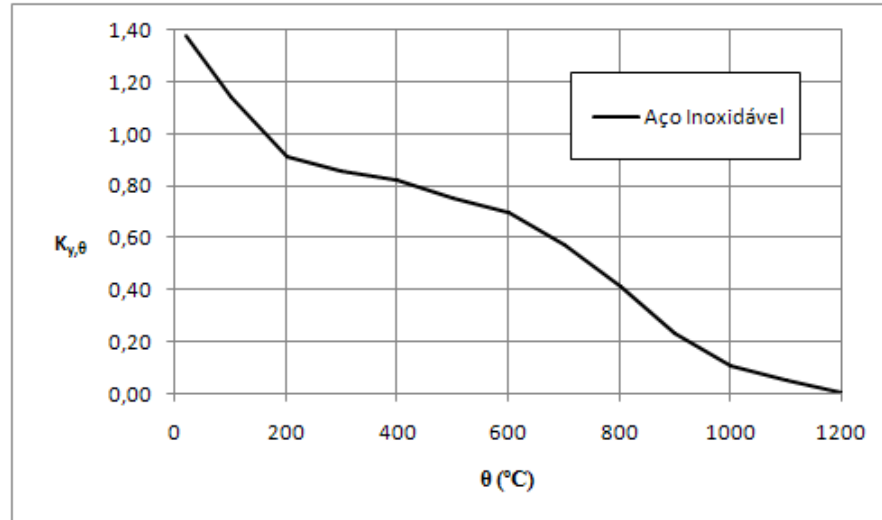


Figura 5. 22 - Factor de redução para a relação da força-tensão do aço inoxidável

Para a determinação do factor de redução da tensão de cedência determina-se através de:

$$k_{y,\theta} = \left[f_{0,2p,\theta} + k_{2\%,\theta} \times (f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta}) \right] \times \frac{1}{f_y} \quad (5.19)$$

Pela expressão 5.19, os factores dependem:

- Factor de redução para a elasticidade $k_{0,2p,\theta} = \frac{f_{0,2p,\theta}}{f_y}$; (5.20)

- Factor de redução para a tensão última $k_{u,\theta} = \frac{f_{u,\theta}}{f_u}$. (5.21)

No caso do aço inoxidável os valores nominais das tensões de cedência (f_y) e tensão última (f_u) à temperatura ambiente, em perfis laminados a quente encontram-se na tabela 5.3, o aço inoxidável 1,4301 cujas propriedades mecânicas são conhecidas a altas temperaturas.

Tipo de aço inoxidável	Classe	f_y Mpa	f_u Mpa	E Gpa
Austeníticos	1,4301	210	520	200

Tabela 5. 3 - Valores nominais da tensão de cedência, da tensão última e do módulo de elasticidade de do aço inoxidável 1,4301 laminados a quente

É um aço inoxidável austenítico capaz de uma boa resistência à corrosão, a principal característica de fabrico e o que tem um maior uso nas estruturas.

Visto já ter sido estudado as expressões analíticas, encontram-se actualmente no EC3, aqui o ponto de partida vai ser o método 1 e método 2 do EC3-1-1. Com as respectivas adaptações dos seus coeficientes e verificar até aonde pode haver uma comparação. Sendo assim, as expressões 4.66 e 4.67 são as utilizadas para o efeito de encurvadura.

5.4.1.1. Método 1

Este ponto é igual ao ponto 4.4.2.1., em que o método 1 vai ter factores de interacção diferentes por causa do comportamento do aço inoxidável ao fogo. Os factores de interacção para perfis das classes 1 e 2, através do método 1 (grupo Franco-Belga) de acordo com as propriedades plásticas da secção transversal e considerando a flexão composta e desviada com encurvadura lateral continuam a ser calculados da mesma forma.

5.4.1.2. Método 2

Aqui sucede-se o mesmo que o ponto 4.4.2.2., em que o método 2 vai ter factores de interacção diferentes e deve-se ao tipo de material utilizado. A metodologia utilizada neste método pelo grupo Austro-Alemão é baseada no conceito de factores globais, logo a determinação dos factores de interacção é um processo mais simples. Logo na determinação dos factores de interacção continuam a ser calculados da mesma forma.

5.5. Comparação das formulações em aço inoxidável ao fogo

Foi analisada uma viga-coluna em aço inox, sujeita a uma carga distribuída ($\psi_y = \psi_z = 1$) em toda a sua secção. As seguintes figuras apresentam uma comparação dos métodos 1 e 2 adaptados à parte do EC3-1-2, sujeita a uma temperatura de 500°C.

5.5.1. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta e também a curva analítica do EC3-1-2 (CEN, 2005).

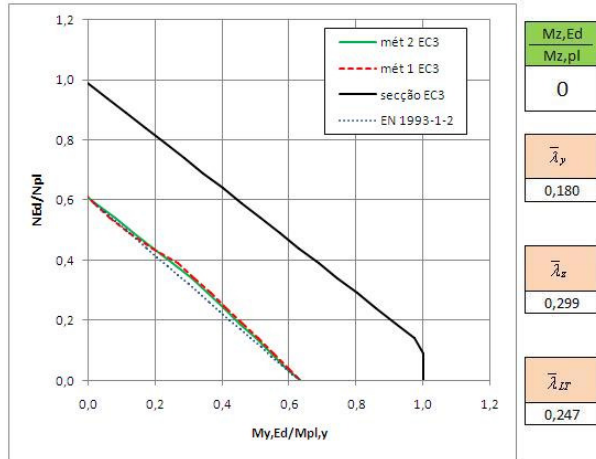


Figura 5. 23 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

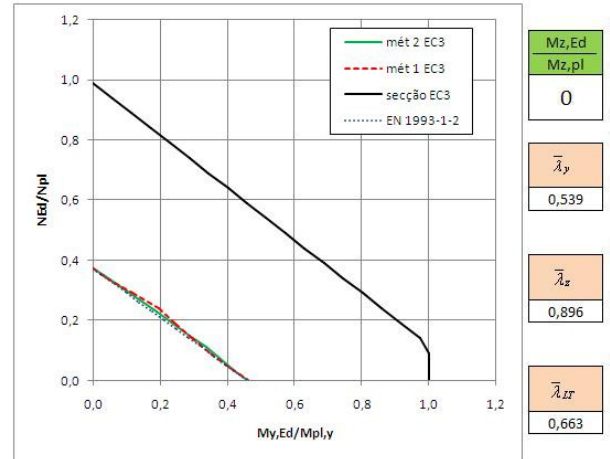


Figura 5. 24 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

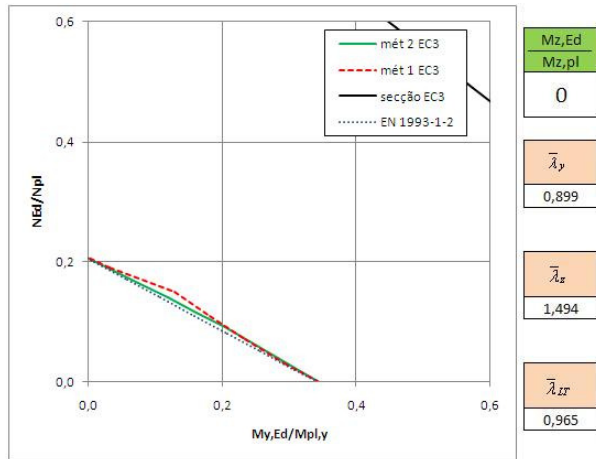


Figura 5. 25 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

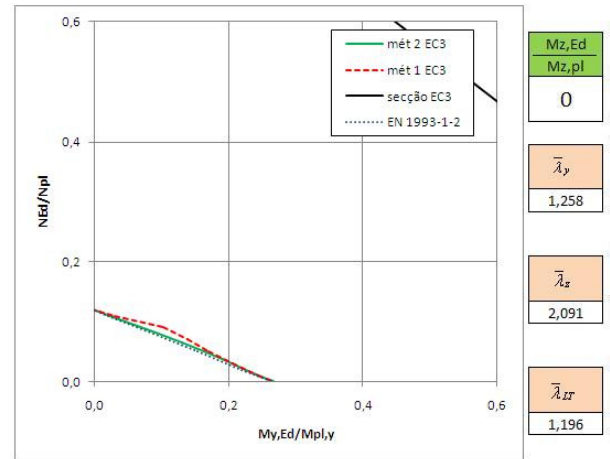


Figura 5. 26 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

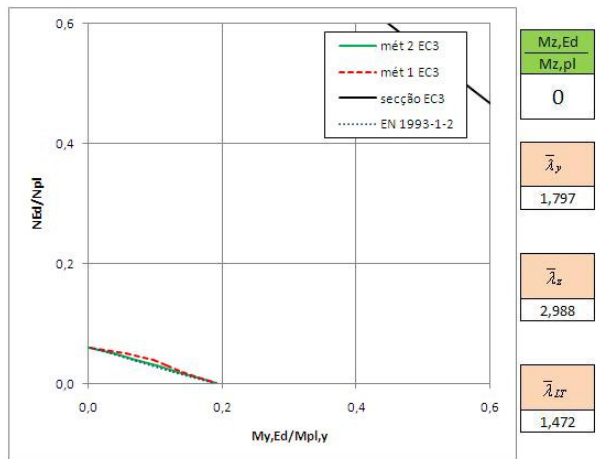


Figura 5. 27 - Viga-coluna: $l = 10,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0$; 500°C

As figuras 5.23 a 5.26 demonstram os métodos 1 e 2 sujeitos a uma flexão composta ($N+My$) e sujeitas a uma temperatura de 500°C bem como a curva analítica do EC3-1-2. As curvas tiveram um comportamento regular, quer seja em comparação com os métodos 1 e 2, quer seja com a curva analítica pertencente ao Eurocódigo. Apesar das diferenças existentes (figura 5.23), constata-se que para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $My_{Ed}/My_{pl} = 0$ as curvas são todas convergentes. A curva EC3-1-2 apresenta uma aproximação aos métodos 1 e 2 ou vice-versa.

5.5.2. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,2$

Nas figuras seguintes, os métodos 1 e 2 vão estar sujeitos à flexão composta e desviada, sendo possível verificar uma maior diferença entre eles.

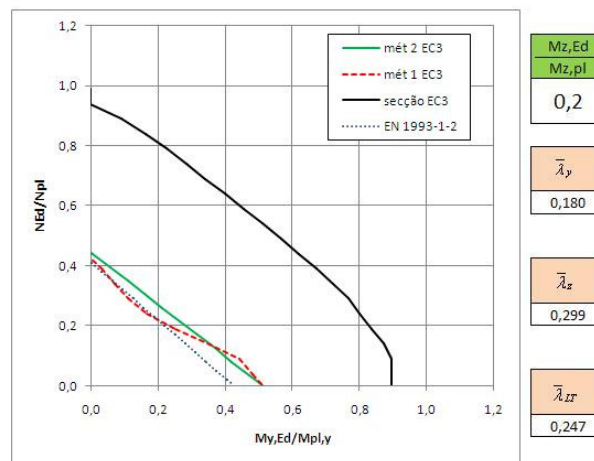


Figura 5. 28 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

Observando a figura 5.28, esta mudou em relação às figuras anteriores e os métodos 1 e 2 deixaram de convergir em simultâneo para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $My_{Ed}/My_{pl} = 0$ bem como a curva EC3-1-2. Se antes a convergência das curvas dependia apenas dos factores de redução para a compressão e do momento em y-y, agora ficam sujeitos à flexão composta e desviada. A existência de dois momentos provocou um afastamento do método 1 do método 2 entre os pontos 0 e 0,44 do eixo My_{Ed}/My_{pl} . Acontece isso, porque entre esses pontos do eixo My_{Ed}/My_{pl} é definido pela expressão 4.23 (z-z) e no resto do eixo é definido pela expressão 4.22. Acaba por ter uma curva irregular comparativamente com a do método 2 e a curva EC3-1-2. Isto porque os factores de interacção em z-z começam a diferir como se pode verificar para $My_{Ed}/My_{pl} = 0,2$ as curvas são definidas pela expressão 4.23 (método 1: $k_{zz} = 1,556$; $k_{zy} = 0,669$ e método 2: $k_{zz} = 0,999$; $k_{zy} = 0,899$). Mas a figura 5.28 apresenta o comportamento do método 1 de duas formas: quando N_{Ed}/N_{pl} tende para zero tem o comportamento da curva do método 2 e quando My_{Ed}/My_{pl} tende para zero tem o comportamento da

curva EC3-1-2. Apesar desta curva de formato irregular, o EC3 (CEN, 2005) continua a apresentar a sua curva analítica mais conservadora em relação aos métodos, principalmente o método 2.

As figuras 5.29 a 5.31 apresentam gráficos com os mesmos parâmetros que a figura 5.28, excepto no comprimento de encurvadura. Verifica-se um comportamento diferente no método 1, ou seja, sem haver grande variação ao longo da curva.

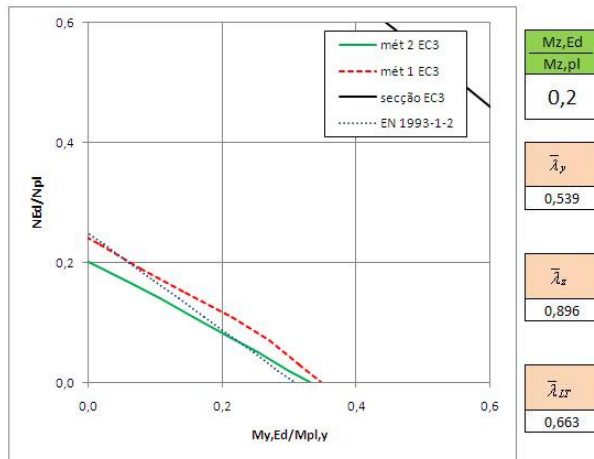


Figura 5. 29 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

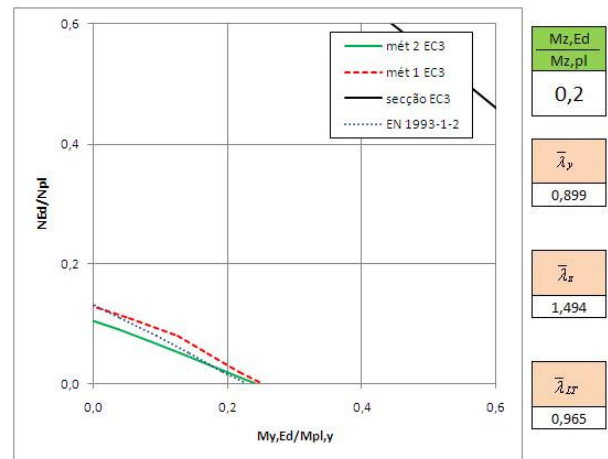


Figura 5. 30 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

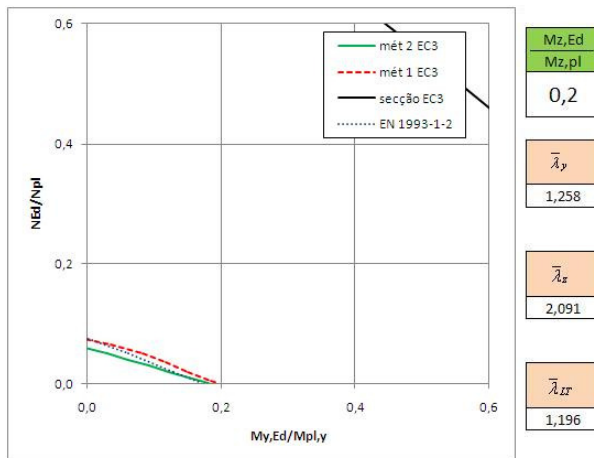


Figura 5. 31 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,2$; 500°C

Com o comprimento de encurvadura a aumentar, comparar as curvas do método 2 com a do EC3-1-2, repara-se numa aproximação das mesmas ao longo dos vários gráficos dispostos nas figuras 5.29 a 5.31. Esta aproximação deve-se aos factores de interacção terem valores mais próximos como se pode verificar (figura 5.30):

Para $n = 0,1$:

- método 1: $k_{zz} = 1,267$; $k_{zy} = 0,624$;
- método 2: $k_{zz} = 1,650$; $k_{zy} = 0,938$;
- EN 1993-1-4: $k_{LT} = 1,000$; $k_z = 1,200$.

Para o mesmo valor de n as expressões de cada curva são:

- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,769 - 2,653 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,975 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 1);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,512 - 1,765 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,844 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (método 2);
- $\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,pl}} = 0,480 - 1,655 \times \frac{N_{Ed}}{N_{pl}} - 0,576 \times \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl}}$ (EC3-1-2).

Se repararmos os valores dos métodos têm as suas diferenças, mas verifica-se sempre o factor a multiplicar por N_{Ed}/N_{pl} é sempre superior ao factor a multiplicar por $M_{z,Ed}/M_{z,pl}$. Isto acontece, porque os métodos 1 e 2 e a curva analítica do EC3-1-2 apresentam o factor K_{zz} com valores não muito distantes.

5.5.3. Casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl}=0,4$

A figura 5.32 apresenta uma curva irregular pelo método 1, visto serem duas curvas bastante diferentes pelos dois métodos. A curva do método 1 é definida em todo gráfico pela expressão 4.67 (z-z) o mesmo sucedendo à curva do método 2. A questão é que o método 2 apresenta praticamente uma recta o mesmo sucedendo à curva do EC3-1-2.

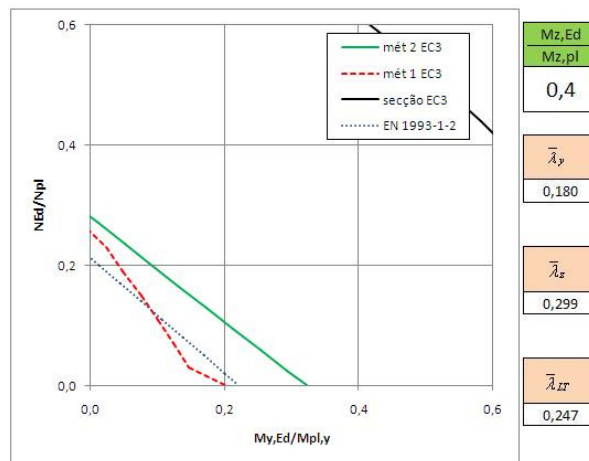


Figura 5. 32 - Viga-coluna: $l = 1,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C

As figuras 5.33 a 5.35 apresentam gráficos com os mesmos parâmetros que a figura 5.32, excepto no comprimento de encurvadura. Verifica-se um comportamento diferente no método 1, ou seja, sem haver grande variação ao longo da curva.

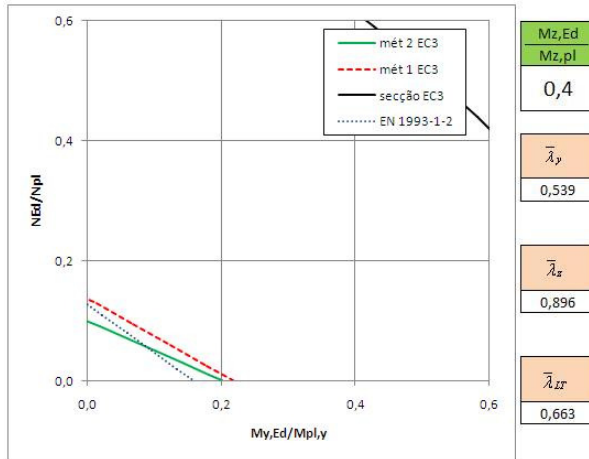


Figura 5. 33 - Viga-coluna: $l = 3,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C

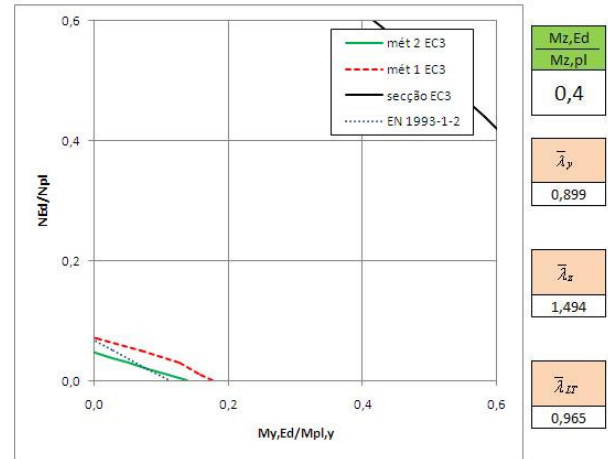


Figura 5. 34 - Viga-coluna: $l = 5,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C

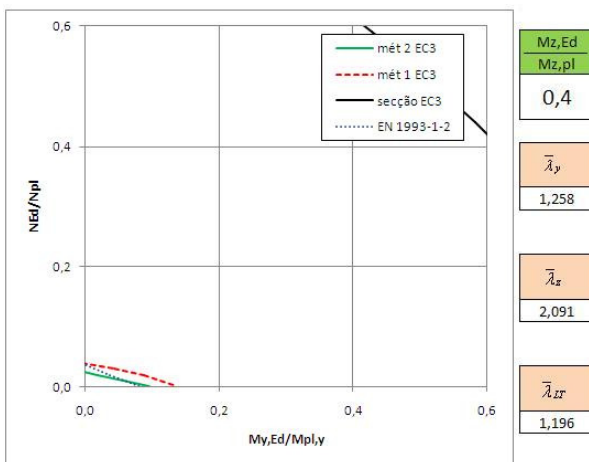


Figura 5. 35 - Viga-coluna: $l = 7,0$ m; $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,4$; 500°C

As figuras 5.33 a 5.35 apresentam uma convergência da curva analítica do EC3-1-2 com o método 1 para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$. Apesar de não se verificar para o comprimento de encurvadura igual a um metro, a tendência muda e também aparece a curva do método 1 com um comportamento regular. As curvas dos métodos 1 e 2 tendem-se a acompanhar com as devidas diferenças, por causa dos factores de interacção. Mas a curva analítica demonstrou um declive diferente em relação às curvas dos métodos 1 e 2, apesar de tudo não demonstrou um maior ou menor conservadorismo no dimensionamento da viga-coluna sujeita à encurvadura lateral com torção.

Para o fogo, os casos de estudo para $M_{z,Ed}/M_{z,pl} = 0,6$ não foram observados aqui por apresentarem valores muito pequenos e com poucos pontos.

5.6. Conclusões

Neste capítulo a verificação da resistência do elemento à encurvadura lateral com torção foi utilizado o método das secções laminadas e soldadas equivalentes e para o carregamento $\psi_y = \psi_z = 1,0$. Mais uma vez a utilização das expressões do EC3-1-1 (método 1 e método 2) para vigas-coluna à temperatura ambiente e verificar o comportamento das curvas com a curva analítica do EC3-1-4.

Quando o perfil é sujeito à flexão composta, ambos os métodos convergem para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ como se verifica na curva analítica da parte 1-4, contudo existem variações ligeiras das curvas dos métodos 1 e 2 com a do EC3-1-4. Esta demonstrou ser ligeiramente mais conservadora para todos os comprimentos de encurvadura sendo que se encontra em vigor na limitação da segurança dos elementos.

Quando sujeitos a mais do que um momento, a flexão composta e a desviada constatou-se que a curva do método 1 apresentava um formato irregular em alguns casos. Tendo em conta alguns pontos (4.3.2 e 4.3.3) existe um afastamento da curva do método 1 do método 2. A divergência entre os métodos 1 e 2 foi diminuindo à medida que o comprimento de encurvadura aumentava. Enquanto no método 1 era possível ver a transição das expressões do eixo y-y para o eixo z-z no método 2 isso não acontecia. Apesar da irregularidade apresentada pelo método 1 é demonstrada de duas formas: quando N_{Ed}/N_{pl} tende para zero tem o comportamento da curva do método 2 e quando $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$ tende para zero tem o comportamento da curva EC3-1-4. Contudo ao longo dos vários gráficos dos pontos referidos anteriormente a curva analítica deixou de ser tão conservadora como acontecia para a flexão composta, encontrando-se muitas vezes entre os dois métodos.

Na verificação da resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral com torção e ao fogo, utilizou-se o procedimento do EC3-1-1 adaptado à parte 1-2 em que se fez as respectivas alterações do aço inoxidável aos factores de redução, de imperfeição e factores para a relação força-tensão. Ambos os métodos, quando sujeitos à flexão composta tiveram um comportamento esperado, desde a convergência para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ bem como a curva analítica do EC3-1-2. Quando o elemento é submetido à flexão composta e desviada verifica-se uma vez mais um formato irregular da curva do método 1 em relação ao método 2, (4.5.2 e 4.5.3) devido à transição da expressão utilizado de um eixo para o outro, enquanto no método 2 a transição torna-se invisível. Isto acontece devido à diferença significativa que existe nos valores de interacção definidos pelo método 1 para y-y e para z-z. Mas reparou-se na manutenção de todos os parâmetros, excepto no comprimento de encurvadura as curvas dos métodos se aproximarem como a curva analítica da parte 1-2. Outro aspecto é a convergência do método 1 com a curva EC3-1-2 para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ e a convergência do método 2 com a curva EC3-1-2 para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ nos pontos referidos.

Capítulo 6

Conclusões

Capítulo 6 - Conclusões

6.1. Considerações finais	105
6.2. Desenvolvimentos futuros.....	106

6.1. Considerações finais

O estudo efectuado nesta tese permitiu verificar o comportamento de vigas-coluna em função do tipo de material à temperatura ambiente e à temperatura de incêndio, porque apresentam propriedades mecânicas diferentes. O princípio usado foi a utilização dos métodos 1 e 2 apresentados no EC3-1-1, partindo para EC3-1-2 no aço carbono e inoxidável e para EC3-1-4 no aço inoxidável com as respectivas alterações aos factores de redução, de imperfeição e factores para a relação força-tensão.

De acordo com os estudos apresentados no capítulo 3, as curvas dos métodos 1 e 2 à temperatura ambiente mostraram bom comportamento quando o elemento está sujeito à flexão composta. Numa observação mais detalhada, verificou-se convergência para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ independentemente de alterar o comprimento de encurvadura do elemento. As curvas não apresentaram grandes diferenças entre si. Mas quando se trata de um elemento sujeito à flexão composta e desviada começaram as primeiras diferenças entre as curvas dos métodos bem como a forma irregular da curva do método 1 e principalmente para o comprimento de encurvadura igual a 1 metro. Estas diferenças em alguns gráficos devem-se à transição entre a expressão 4.22 (y-y) e a expressão 4.23 (z-z) na curva do método 1, mas noutros casos a curva do método 1 assume uma forma irregular e sendo definida a curva na totalidade do gráfico pela expressão 4.23. Estas formas devem-se ao factor de interacção k_{zz} ter valores muito diferentes em ambos os métodos e no caso do método 1 apresentar valores superiores em relação ao método 2 (método1: $k_{zz}=1,546$ e método2: $k_{zz}=0,976$ no ponto 4.3.3). Estas diferenças e a forma irregular tendem a desaparecer com o aumento de encurvadura por parte do método 1 e em muitos casos aparece uma convergência entre os métodos.

Considerando a temperatura de incêndio, neste caso a 500°C, o elemento sujeito à flexão desviada observou-se um bom comportamento por parte das curvas em relação aos métodos 1 e 2 e a curva analítica do EC3-1-2 para o aço carbono. Existiu convergência em todos os gráficos e neste tipo de acção as curvas e a metodologia aplicada é possível ser aplicada. O mesmo não se verificou para o elemento submetido à flexão composta e desviada, primeiro existiu um maior conservadorismo por parte da curva analítica do EC3-1-2 na definição dos limites de resistência e as curvas de ambos os métodos não estiveram do lado da segurança e depois existiram algumas divergências (4.5.3) devido à diferença dos factores utilizados entre os métodos 1 e 2 bem como os valores dos factores de interacção utilizados na curva analítica.

De acordo com os estudos apresentados no capítulo 5, as curvas dos métodos 1 e 2 e a curva analítica do EC3-1-4 à temperatura ambiente mostraram bom comportamento quando o elemento está sujeito à flexão composta. Numa observação mais detalhada, verificou-se convergência para $N_{Ed}/N_{pl} =$

0 e $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ independentemente de alterar o comprimento de encurvadura do elemento. As curvas não apresentaram grandes diferenças entre si e as verificadas no método 1 devem-se à transição da expressão 4.22 e a expressão 4.23 apesar de serem mínimas. Quando o elemento é sujeito à flexão composta e desviada os métodos 1 e 2 deixaram de convergir para $N_{Ed}/N_{pl} = 0$ e para $M_{y,Ed}/M_{y,pl} = 0$ bem como a curva EC3-1-4. O ponto 5.3.2 apresenta um comportamento do método 1 de duas formas: quando N_{Ed}/N_{pl} tende para zero tem a convergência da curva do método 2 e quando $M_{y,Ed}/M_{y,pl}$ tende para zero tem a convergência da curva EC3-1-4. Apesar desta curva de formato irregular, o EC3-1-4 continua a apresentar a sua curva analítica mais conservadora em relação aos métodos, principalmente o método 2. A forma irregular do método 1 tende a desaparecer com o aumento do comprimento de encurvadura e acompanhar o comportamento da curva do método 2, mas mesmo assim as curvas apresentam declives diferentes da curva analítica do EC3-1-4 devido aos valores apresentados pelos factores de interacção.

Considerando a temperatura de incêndio, neste caso a 500°C, o elemento sujeito à flexão desviada observou-se um bom comportamento por parte das curvas em relação aos métodos 1 e 2 e a curva analítica do EC3-1-2 para o aço inoxidável. Existiu convergência em todos os gráficos e neste tipo de acção as curvas e a metodologia aplicada é possível ser aplicada. O mesmo não se verificou para o elemento submetido à flexão composta e desviada, a curva analítica demonstrou um declive diferente em relação às curvas dos métodos 1 e 2, apesar de tudo não demonstrou um maior ou menor conservadorismo no dimensionamento da viga-coluna sujeita à encurvadura lateral com torção.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Os estudos realizados foram obtidos através de uma folha de cálculo formatada a apresentar automaticamente as curvas de encurvadura. Quando o elemento era sujeito à flexão composta apresentou sempre bons resultados na comparação dos métodos 1 e 2 bem como das curvas analíticas referentes a cada parte do EC3, o mesmo não verificando quando o elemento era sujeito à encurvadura sujeita à flexão composta e desviada referentes às várias partes do EC3.

Por fim, devem ser desenvolvidos estudos para a verificação da segurança de vigas-coluna com:

- outros tipos de carregamentos;
- realização de simulações numéricas;
- escolha de outros perfis comerciais.

Bibliografia

ARCELOR, “Beams, channels and merchant bars, sales programme”, Arcelor Sections Commercial ;

BOISSONNADE, N., MUZEAU, J-P, (2000). “Development of new interaction formulae for beam-columns”, Proceedings of the International Conference on steel structures of the 2000's, Istanbul Technical University, pág. 233-238;

BOISSONNADE, N.; JASPART, J-P; MUZEAU, J-P; VILLETTE, (2002). M., “Improvement of the interaction formulae for beam columns in Eurocode 3 Computers & Structures”, Vol. 80, pág. 2375-2385;

BOISSONNADE, N.; JASPART, J-P; MUZEAU, J-P; VILLETTE, M., (2004). “New interaction formulae for beam-columns in Eurocode 3”, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 60, pág. 421-431;

BOISSONNADE, N.; GREINER, R.; JASPART, J-P, (2006). “Rules for member stability in EN 1993-1-1 Background documentation and design guidelines”, ECCS Technical Committee 8 – Stability;

BUREAU, A.; GALÉA, Y.; JASPART J-P; MAQUOI R.; MUZEAU J-P; VILLETTE, M., (1999). “Proposal for revision of Eurocode 3”, TC8-ECCS Meeting;

CEN: European Committee for Standardisation, “Eurocode 3 (2005): Design of steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings”, EN 1993-1-1, Brussels;

CEN: European Committee for Standardisation, “Eurocode 3 (2005): Design of steel Structures – Part 1-2: General Rules – Structural fire design”, EN 1993-1-2, Brussels;

CEN: European Committee for Standardisation, “Eurocode 3 (2006): Design of steel Structures – Part 1-4: General Rules – Supplementary rules for stainless steels”, EN 1993-1-4, Brussels;

DAVIES, J.M., (2000). “Recent research advances in cold-formed steel structures”, Journal of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol. 55, pág. 267-288;

DOWLING, P.J., Knowles, P.; Owens, G.W., (1988). “Structural Steel Design”, The Steel Construction Institute;

DUBINA, D.; UNGUREANU, V., (2002). “Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members, Thin-Walled Structures, Vol. 40, pág. 239-262;

- ESDEP** (2010). Course, <http://www.fgg.uni-lj.si/kmk/esdep/master/toc.htm> (consultado em Janeiro 2010);
- ESTRADA, I.; REAL, E.; MIRAMBELL, E.**, (2006). “General behavior and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 63, pág. 970-984;
- FRANSSEN, J; SCHLEICH, J.; CAJOT, L.**, (1995). “A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members According to Eurocode 3”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 35, pág. 49–69;
- FRANSSEN, J; SCHLEICH, J.; CAJOT, L.; AZPIAZU, W.**, (1996). “A Simple Model for the Fire Resistance of Axially-loaded Members – Comparison with Experimental Results”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 37, pág. 175–204;
- GREINER, R.; LINDNER, J.**, (2006). “Interaction formulae for members subjected to bending and axial compression in EUROCODE 3”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 62, pág. 757-770;
- HUBER, N.; HEERENS, J.**, (2008). “On the effect of a general residual stress state on indentation and hardness testing”, *Acta Materialia*, Elsevier, Vol. 56, pág. 6205-6213;
- LINDNER, J.**, (2003). “Design of beams and beam columns”, *Program Engineering Structures*, Vol. 5, pág. 38-47;
- LOPES, N.**, (2009). “Behaviour of stainless steel structures in case of fire”, tese de doutoramento da Universidade de Aveiro;
- LOPES, N., VILA REAL, P., PILOTO, P., MESQUITA, L; SILVA, L.**, (2005). “Modelação numérica da encurvadura lateral em vigas I em aço inoxidável sujeitas a temperaturas elevadas”, *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*;
- MANFRED A. H., ROLF B.**, (1994). “Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement”, *Construction Métallique*, Vol. 10, Walther R., Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pág. 87-167;
- MAQUOI, R.; RONDAL, J.**, (1978). “Mise en equation des nouvelles courbes Européennes de flambement”, *Construction Métallique*, CTICM;
- MAQUOI, R.; BOISSONNADE, N.; MUZEAU, J-P; JASPART, J-P; VILLETTE, M.**, (2001). “The interaction formulae for beam-columns: a new step of a yet long story.”, *Proceedings of the 2001 SSRC Annual Technical Session & Meeting*, pág. 63-88;

- MASSONNET, C.**, (1976). “40 years of research on beam-columns in steel”, *Solid Mech Arch*;
- Metálica** (2010): <http://www.metalica.com.br> (consultado em Fevereiro 2010);
- OFNER, R.**, (1997). “Traglast von Staben aus Stahl bei Druck und Biegung”(em alemão), tese de doutoramento da Universidade;
- REIS, A.; CAMOTIM D.**; (2001). “Estabilidade Estrutural”, McGraw-Hill;
- RUGARLI, P.**, (2009). “Classification of I- or H-shaped cross-sections under mixed internal actions”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 65, pág. 1597-1606;
- RYU, H-K.; YOUN, S-G; BAE, D.; LEE, Y-K**, (2006). “Bending capacity of composite girders with Class 3 section”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 62, pág. 847-855;
- TRAHAIR, N., BRADFORD, M., NETHERCOT, D.**, (2001). “The behaviour and design of steel structures to BS5950”, Spon Press;
- VINNAKOTA, S.**, (1977). “Inelastic stability of laterally unsupported I-beams”, *Computers & Structures*, Elsevier, Vol. 7, pág. 377-389;
- VILA REAL, P., LOPES, N., SILVA, L.**, (2009). “Stainless steel beam-columns interaction curves with and without lateral torsional buckling”, 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference.